N° d'ordre

Université Scientifique et Médicale de Grenoble

Service de Géophysique

BERNARD FABRE

PETROGRAPHIE STRUCTURALE DE LA GLACE PROFONDE VALLEE BLANCHE SUPERIEURE (Massif du Mont-Blanc)

(THESE DE TROISIEME CYCLE)

1973

Publication n° 157 du Laboratoire de Glaciologie du
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Scientifique et Médicale de Grenoble

Service de Géophysique

BERNARD FABRE

PETROGRAPHIE STRUCTURALE DE LA GLACE PROFONDE VALLEE BLANCHE SUPERIEURE (Massif du Mont-Blanc)

(THESE DE TROISIEME CYCLE)

Thèse soutenue le 26 mars 1973 devant le Jury d'Examen

M. L. LLIBOUTRY — *Président*

MM. M. VALLON, P. VIALON — *Examinateurs*

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

La présente étude a été réalisée dans le cadre du Laboratoire de Glaciologie du C.N.R.S. à Grenoble.

Le Professeur Lliboutry, Directeur du Laboratoire, m'a fait l'honneur de présider le jury.

Les nombreux conseils et remarques de M. Vallon, Maître-Assistant qui a dirigé ce travail m'ont été fort précieux.

M. Vialon, Maître de Conférence en Géologie, a manifesté son intérêt pour cette étude et a accepté de participer au jury.

J'ai apprécié l'aide efficace des ingénieurs et chercheurs de ce laboratoire, particulièrement M. Duval, et de tous les techniciens, secrétaires et dessinateur, en particulier, lors du travail sur le glacier, celle de M. Paillet (pour la stratigraphie).

Je tiens à exprimer à tous mes remerciements.

PLAN

Introduction

1 - Etat des connaissances
- 1 - 1 - Les résultats
- 1 - 2 - Les théories

2 - Prélèvement des échantillons
- 2 - 1 - Lieu de prélèvement
  - 2 - 1 - 1 - Le site
  - 2 - 1 - 2 - Raisons de ce choix
- 2 - 2 - Matériel et campagne de prélèvements
- 2 - 3 - Transport et stockage des échantillons

3 - Etude des échantillons
- 3 - 1 - Remarques préliminaires
  - 3 - 1 - 1 - Le problème de l'orientation
  - 3 - 1 - 2 - Problème de la recristallisation post-cinématique
    - a - prélèvement d'un échantillon
    - b - étude pétrographique
    - c - cinétique de recristallisation
    - d - pétrographie de la glace après recristallisation post-cinématique
- 3 - 2 - Résultats
  - 3 - 2 - 1 - Stratigraphie du forage
    - a - description
    - b - origine de la foliation
  - 3 - 2 - 2 - Pétrographie
    - a - méthode
      - α - fabrication des lames minces
      - β - précautions
      - γ - étude des stéréogrammes
      - δ - taille des grains
      - ε - forme des grains
    - b - résultats

4 - Essai de synthèse
- 4 - 1 - Taille des cristaux
- 4 - 2 - Morphologie des cristaux
- 4 - 3 - Forme des cristaux
- 4 - 4 - Textures
  - a - gros cristaux
  - b - petits cristaux
- 4 - 5 - Observations complémentaires

Conclusion

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41534920_0030

RESUME

L'étude préalable de la recristallisation post-cinématique d'un échantillon de glace prélevé au contact du lit et plongé dans l'azote liquide dès son extraction a révélé une croissance très rapide des cristaux à 0°C (taille moyenne multipliée par 8 au bout de 8 heures). Le stéréogramme des orientations des axes, après 48 heures à 0°C, est comparable au stéréogramme obtenu pour la glace non recristallisée : les orientations préférentielles ont la même direction, mais l'intensité des maximums est plus faible pour les échantillons recristallisés.

Au-delà de l'horizon aquifère, à 33 m de profondeur, se développe progressivement dans la glace une texture feuilletée (ségrégation des inclusions gazeuses en couches discrètes). Cette foliation qui intéresse 20 % de la glace bulleuse vers 30 m de profondeur, 70 % vers 180 m, est, contrairement à ce que l'on observe dans la zone d'ablation, subhorizontale au voisinage de la surface, très inclinée près du lit (pendage de 65° à 170 m de profondeur). Cette texture disparait au voisinage du lit (180 à 187 m) où la glace ne renferme aucun bulle.

La taille moyenne des cristaux passe rapidement de 1 ou 2 à 10 ou 20 mm de diamètre entre 50 et 80 m. Entre 180 et 187 m la glace est formée de très gros cristaux (3 à 10 cm de diamètre).

L'orientation subverticale très forte des axes optiques des cristaux de glace du névé disparait rapidement et dès 66 m apparait dans la glace largement cristallisée (cristaux de plus de 1 cm^2 de section) une texture à maximums multiples (généralement 3 ou 4 directions dessinant un triangle ou un losange). La morphologie des cristaux ne semble pas liée à la foliation mais plutôt à l'orientation de leurs plans de base : figures d'orientation préférentielle et allongement des grains conservant une position fixe par rapport à la verticale entre 66 et 180 m.

Par contre les tout petits cristaux (quelques mm^2) formant des bandes parallèles au plan de foliation montrent une seule direction d'orientation préférentielle (ou 2 proches) au voisinage du pôle du plan de foliation. Les cristaux de taille intermédiaire (10 à 50 mm^2) ont généralement 2 directions d'orientation préférentielle à une cinquantaine de degrés l'un de l'autre, de part et d'autre du pôle du plan de foliation.

INTRODUCTION

La mécanique des glaciers tempérés permet de connaître avec une précision satisfaisante l'écoulement d'une masse de glace. Le mécanisme élémentaire de cette déformation, à l'échelle de l'échantillon polycristallin, et l'interaction d'un cristal avec ses voisins sont encore mal connus. Les efforts de ces dernières années ont porté sur l'étude en laboratoire de la déformation d'un échantillon soumis à des contraintes données et de l'évolution de sa texture. Cependant il n'est pas de meilleur champ expérimental que le glacier de haute montagne, base naturelle pour laquelle le Laboratoire n'est qu'un complément. Au cours de la campagne d'été 1971, le Laboratoire de Glaciologie (C. N. R. S.) a effectué un forage dans la zone d'accumulation d'un glacier alpin : la partie supérieure de la Vallée Blanche. Nous abordons l'étude statistique des orientations cristallines des échantillons prélevés depuis la surface jusqu'au lit rocheux, 187 m plus bas.

1 - Etat des connaissances

1 - 1 - Les résultats

La première étude concernant la pétrographie de la glace a été publiée par Perutz et Seligman (1939) pour des échantillons prélevés sur des parois de crevasses. Bader (1951) et Rigsby (1951) ont mis en évidence l'anisotropie de la glace : existence d'orientations privilégiées pour les cristaux de glace de glacier. En règle générale il existe 4 directions préférentielles disposées, sur la projection stéréographique de Schmidt, aux sommets d'un losange.

Kamb (1959 a) montre également l'existence de plusieurs directions préférentielles pour la glace grenue bulleuse (coarse bubbly ice). Selon lui, elles proviennent de la recristallisation paracinématique, à partir d'un maximum unique centré sur le pôle du plan de foliation. Il précise que les deux maximums les plus intenses sont situés de part et d'autre du pôle de foliation et font entre eux un angle de 45°. Les deux autres sont également situés de part et d'autre du pôle de foliation, et écartés de 85°. L'ensemble des 4 directions forme un losange sur le stéréogramme.

En Antarctide, Kizaki (1962) met en évidence une texture à plusieurs maximums. Il a montré un peu plus tard (Kizaki 1969) l'existence en un même lieu, à la fois d'une texture à simple et à plusieurs maximums. Reid (1964) a observé sur le Shelf de Ross que les axes optiques se répartissaient suivant 4 maximums, centrés autour du pôle du plan de cission maximale. Sur le stéréogramme, ils forment un petit rectangle dont les sommets voisins sont distants de 30° et 40°.

Dans un glacier du Caucase, Blinova et Troshkina (1962) trouvent une seule orientation préférentielle des cristaux (cité par Jonsson, 1970).

En laboratoire, Steinemann (1958) observe la recristallisation paracinématique . Les axes optiques sont groupés selon trois directions : deux de part et d'autre du pôle de cisaillement permanent et un autre vers l'avant. Des expériences de Wakahama n'ont jamais pu mettre en évidence d'autres plans de glissement que le plan de base (Cf. Lliboutry, 1965, p. 126).

Les deux publications les plus récentes sont celles de Vallon (1967), qui a exploité un forage de 60 m sur la Vallée Blanche, et du suédois Jonsson (1970) qui a étudié l'Isfallsglaciären. Ils trouvent jusqu'à 6 maximums entourant le pôle de compression maximum. Ils remarquent un aplatissement des cristaux dans le plan de foliation. Selon Vallon il n'existe aucune relation entre la foliation et la direction des axes optiques, Jonsson soutient le contraire.

1 - 2 - Les théories

A l'heure actuelle, aucune explication satisfaisante des orientations préférentielles observées n'a été donnée. Kamb (1959 b) puis Brace en 1960 d'après la théorie de Mc Donald, (1957) ont calculé la position de ces maximums

d'orientation. Partant du même principe : le calcul de l'énergie élastique des cristaux, ils arrivent à des résultats contradictoires. Aucune des deux théories ne parvient à expliquer les textures observées dans la glace active tempérée.

D'autres tentatives d'explication ont vu le jour. Rigsby avanca l'existence de 4 plans de glissement, pour expliquer la structure à 4 maximums. Cependant il n'a jamais été possible de déformer artificiellement un cristal de glace autrement que par glissement sur les plans de base. Lliboutry (1965) remarque que le cristal de glace ne possède qu'une direction de glissement. Comme il faut disposer de 5 directions distinctes de plans de glissement pour obtenir une déformation quelconque (critère de Von Mises), les cristaux doivent se répartir suivant 5 orientations différentes. L'énergie élastique d'un ensemble de cristaux est minimale lorsque les contraintes sont équitablement réparties entre les grains ; ainsi il ne peut y avoir de cristaux très favorablement orientés par rapport à d'autres, défavorablement orientés. Tous les cristaux devraient donc faire à peu près le même angle avec la normale au plan de cisaillement maximum. Enfin Vallon (1967) tente d'expliquer les orientations observées en examinant la géométrie de la déformation.

2 - Prélèvement des échantillons

2 - 1 - Lieu de prélèvement

2 - 1 - 1 - Le site

Le forage fut effectué sur le plateau supérieur de la Vallée Blanche à 3530 m d'altitude, entre l'Aiguille du Midi, l'arête de la pointe Lachenal et le col du Midi. La glace s'écoule du col du Midi vers l'E-NE.

2 - 1 - 2 - Raisons de ce choix

Depuis une dizaine d'années le glacier est étudié par le Laboratoire de Glaciologie du C.N.R.S. L'accès par le téléphérique, la présence du refuge des Cosmiques, facilitent le travail.

La pente est très faible à l'endroit du forage (5 %). Elle augmente progressivement vers l'aval. Les premières crevasses curvilignes, grossièrement perpendiculaires à la direction de l'écoulement, ne s'ouvrent qu'à quelques centaines de mètres en aval du forage. Le plateau supérieur de la Vallée Blanche a, de ce fait, un caractère relativement homogène.

2 - 2 - Matériel et campagne de prélèvements

Le carottier utilisé est un carottier thermique mis au point au Laboratoire de Glaciologie (Gillet, 1969). L'ensemble du matériel pèse une tonne environ. Le carottier proprement dit, en acier inoxydable, mesure 8 m de haut et pèse 220 kg. Son diamètre extérieur est de 130 mm. La résistance chauffante est en tophet (alliage nickel-chrome). L'énergie électrique est fournie par un groupe électrogène de 10 kW. La puissance dissipée par la tête du carottier (6 kW) permet une vitesse de pénétration de 4 à 5 m par heure.

Les carottes ont été prélevées entre le 7 et le 16 juillet 1971. Elles mesurent 2,5 m de long et 100 mm de diamètre. On a conservé environ 80 cm

d'échantillon pour 10 m de forage entre 35 et 150 m de profondeur. Au-delà, toutes les carottes ont été ramenées. Leur orientation devait être déterminée à l'aide d'une boussole placée sur le carottier, lue à distance grâce à un système photoélectrique. Cependant, dès les premières manipulations, un défaut d'étanchéité a provoqué la panne du système orienteur.

2 - 3 - Transport et stockage des échantillons

Sur le terrain et pendant le transport, les échantillons devraient être conservés à une température négative pour éviter une recristallisation post-cinématique, phénomène considérablement ralenti à basse température (Rigsby, 1960).

Sitôt sortis et découpés en morceaux de 40 cm de long, puis emballés dans des gaines de polyéthylène, les échantillons sont enfermés dans des cantines adiabatiques (l'isolement est constitué par une dizaine de centimètres de polystyrène expansé) avant d'être stockés dans la chambre froide de Chamonix (où règne une température de l'ordre de -10°C) et enfin transportés jusqu'à celle de Grenoble, maintenue à environ - 13°C.

Sur le glacier, les cantines sont recouvertes de neige et ne sont ouvertes qu'à l'ombre. Le transport entre Chamonix et Grenoble s'est effectué au mois d'août, mais de nuit, après un séjour prolongé des carottes et des cantines en chambre froide. Une recristallisation post-cinématique n'a guère pu se produire que sur le glacier, certains échantillons étant restés plusieurs jours à 0°C. Ce problème va faire l'objet d'une étude préalable (voir 3-1-2).

3 - Etude des échantillons

3 - 1 - Remarques préliminaires

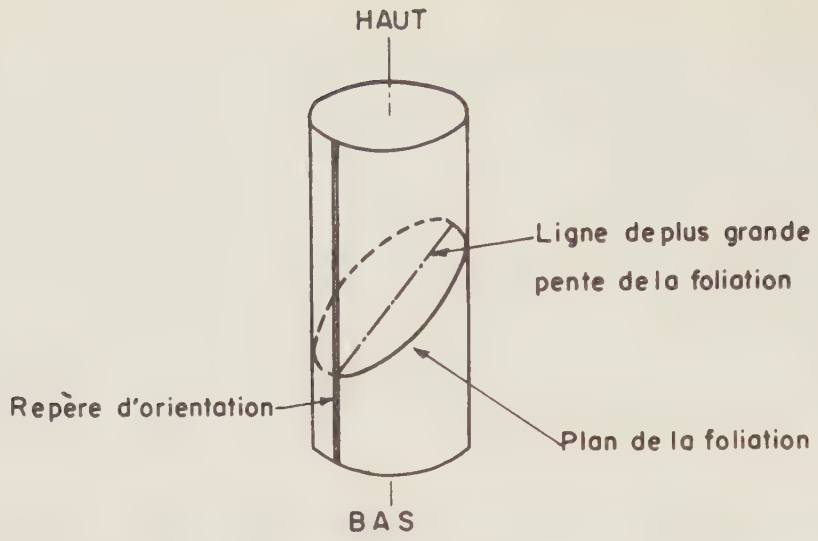
3 - 1 - 1 - Problème de l'orientation

Seul l'axe de la carotte est orienté (haut, bas) et nous ne connaissons ni l'orientation d'un échantillon par rapport à l'autre, ni l'orientation de l'ensemble du carottage par rapport à une direction fixe, par exemple celle de l'écoulement. Le premier problème sera approché grâce à l'existence d'une foliation sur les échantillons.

En zone d'ablation, la foliation est visible en surface. Au centre du glacier, la ligne de plus grande pente de la foliation est approximativement dans un plan formé par la verticale et la ligne d'écoulement (Vallon, 1967). Il est probable que pour tout le forage de la Vallée Blanche la foliation ne subisse de rotation qu'autour d'un axe horizontal perpendiculaire à l'écoulement. Nous utiliserons ainsi les plans formés par les lits de bulles pour orienter nos échantillons les uns par rapport aux autres. Notre repère d'orientation est défini figure 1.

3 - 1 - 2 - Problème de la recristallisation post-cinématique

La seule expérience que nous connaissions date de 1960. Un échantillon de glace froide prélevé par Rigsby au tunnel de Tuto (Groenland) a été laissé à 0°C pendant 1 mois. La taille des cristaux a augmenté de manière



Echantillon de glace

Fig. 1

Définition du repère d'orientation

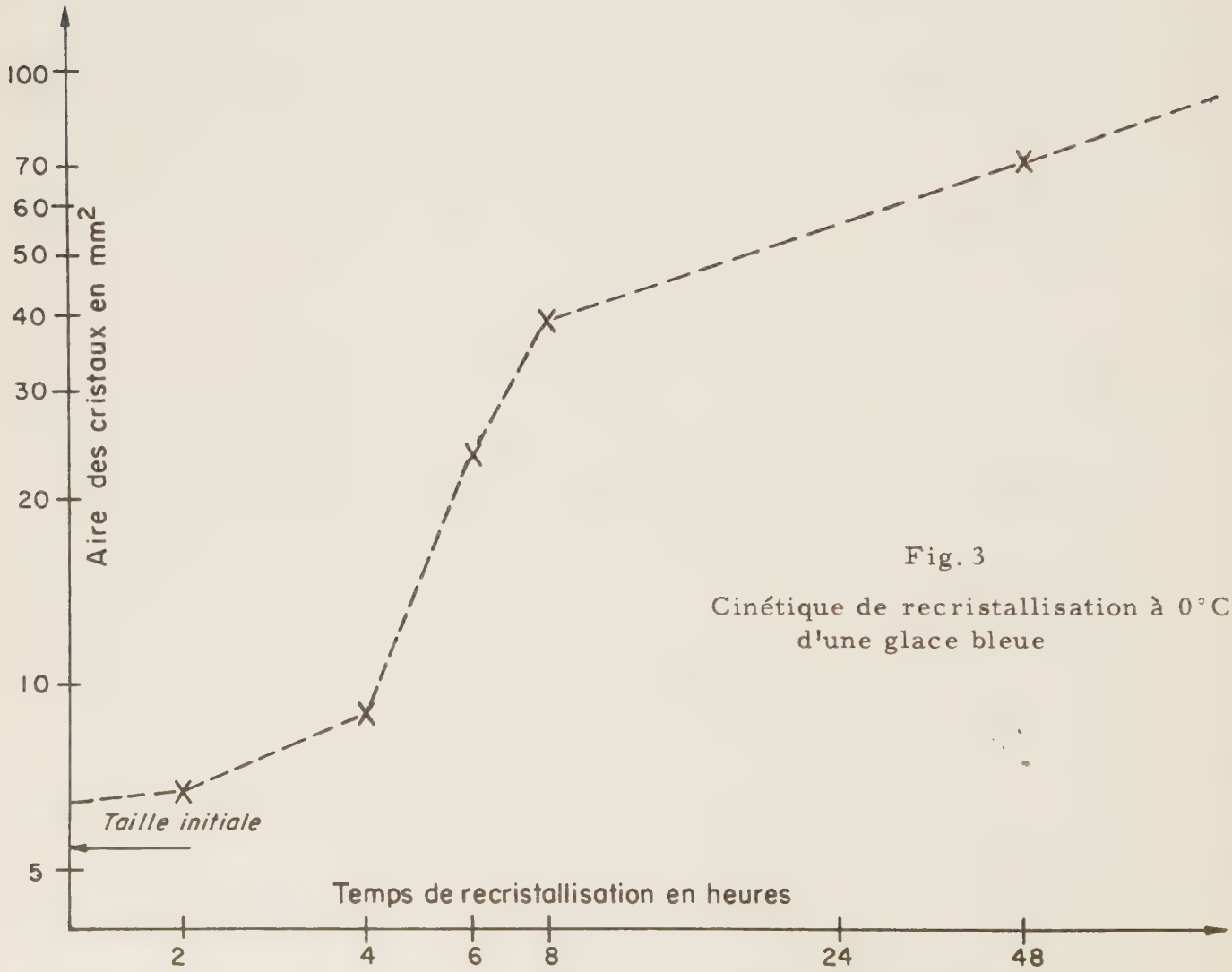
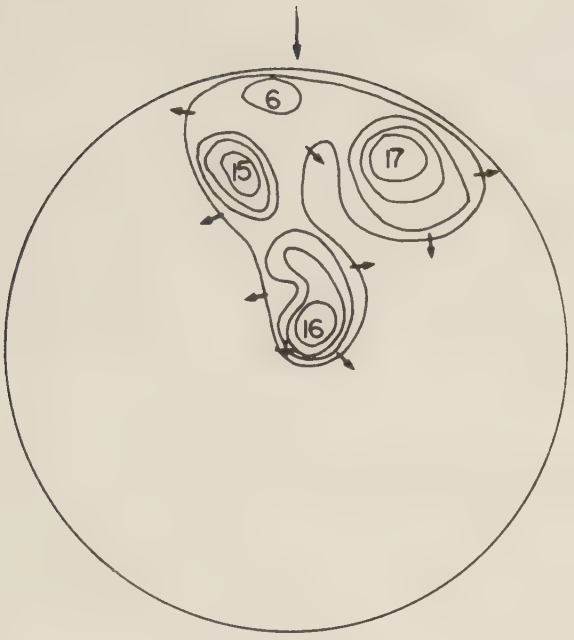


Fig. 3

Cinétique de recristallisation à 0°C d'une glace bleue



Projection de l'hémisphère supérieur

'20 cristaux

Calibre 1 % de l'aire

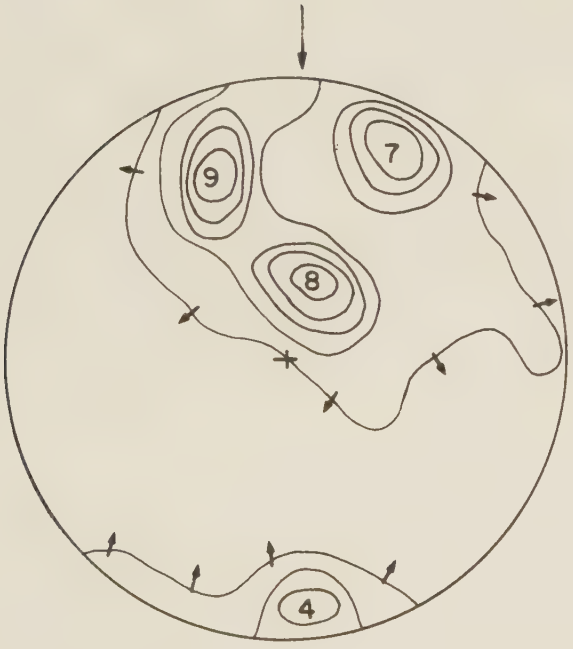
Contours à 0, 4, 8, 12 % des points dans 1 % de l'aire

zone de densité 0 %

17 intensité du maximum 17 % des points dans 1 % de l'aire

Glacier d'Argentière

Fig. 2 - Orientation initiale des axes optiques des cristaux de glace



- Projection de l'hémisphère supérieur
- 127 cristaux
- Calibre 2 % de l'aire
- Contours à 0, 2, 4, 6, 8 % des points dans 1 % de l'aire

Glacier d'Argentière

Fig. 4 - Orientation des axes optiques des cristaux de glace après 48 heures de recristallisation post-cinématique

considérable (surface des sections multipliée par 50).

Nous avons voulu vérifier si au cours d'un bref séjour à 0°C hors de leur état normal de contraintes, les carottes n'avaient pas subi une trop importante recristallisation post-cinématique.

a) Prélèvement d'un échantillon

Un échantillon d'une vingtaine de centimètres de long a été prélevé à la base du glacier d'Argentière, à l'aide d'un carottier mécanique. Il a été immédiatement plongé dans de l'azote liquide. Dès l'instant de son extraction, jusqu'au stockage dans un congélateur (environ à -20°C) il est resté à très basse température. Nous pouvons être certains d'avoir ainsi complètement bloqué la recristallisation.

Le processus de recristallisation, auquel on peut associer une énergie d'activation apparente, a une cinétique très lente dès que la température est notablement inférieure à 0°C. Bien sûr il n'est pas nécessaire d'atteindre la température de l'azote liquide, mais il nous fallait maintenir une température assez basse pendant plusieurs heures, jusqu'à la chambre froide de Grenoble. Des différents procédés envisagés, c'est celui qui s'est finalement révélé le plus sûr et le moins coûteux.

Cette méthode présente néanmoins un inconvénient : lors de la trempe il y a formation de fractures. La masse de l'échantillon est parcourue de fentes très fines formant un réseau de mailles arrondies, d'environ 2 cm de diamètre. Lors du prélèvement, l'orientation de l'échantillon par rapport au mouvement du glacier n'a pas été relevée.

b) Etude pétrographique

L'échantillon ne renferme aucune bulle. Une lame mince, fabriquée peu de temps après l'extraction, montre de très petits cristaux de quelques millimètres carrés de section. Le stéréogramme (fig. 2) présente trois maximums très nets (densité respective 15, 16 et 17 % des points dans 1 % de l'aire), et un quatrième moins net (6 %).

c) Cinétique de recristallisation

Une petite partie de l'échantillon est gardée comme témoin à -20°C. Le reste est maintenu à 0°C, et toutes les 2 heures (entre 0 et 8 h) une lame mince est fabriquée, puis photographiée. L'aire moyenne des sections de cristaux en fonction du temps de recristallisation est reproduite figure 3. Au bout de 6 h, la surface des grains est multipliée par 4 ; après 48 h les cristaux sont en moyenne 14 fois plus gros.

d) Pétrographie de la glace après recristallisation post-cinématique

La texture de l'échantillon demeuré 48 h à 0°C est reproduite figure 4. Nous retrouvons quatre directions d'orientations préférentielles pratiquement identiques à celles observées avant la recristallisation. Par contre leur intensité est plus faible. La région du stéréogramme où la densité est de 0 % est beaucoup plus réduite. La recristallisation, dans ce cas précis, n'a donc provoqué qu'un étalement des orientations d'axes optiques, alors que Rigsby obtint, après

1 mois à 0°C, des orientations aléatoires (mais sur 6 cristaux seulement).

Un mois et demi plus tard, une lame mince de l'échantillon témoin (conservé à -20°C) nous a montré que les cristaux avaient toujours la même taille que ceux de la glace originelle.

Cette brève expérience nous a révélé les problèmes de la recristallisation post-cinématique. Pour stopper ce processus, il faudrait mettre au point un procédé moins brutal que la trempe dans l'azote liquide qui a pu ralentir le démarrage de la recristallisation. D'autre part, l'existence de fentes dans l'échantillon imposait une taille limite aux cristaux ; la recristallisation n'a pas été étudiée au-delà de 48 h.

3 - 2 --Résultats

3 - 2 - 1 - Stratigraphie du forage

a) Description : La stratigraphie du forage est reproduite figure 5. Les 30 premiers mètres de névé, déjà décrits par Petit (1972) ne sont pas reportés. D'autre part les carottes prélevées entre 0 et 40 m n'ont pas été étudiées car elles avaient subi une fonte importante.

Remarquons que, à quelques exceptions près, toute la glace est bulleuse jusqu'à 180 m. En revanche, les 7 derniers mètres, contre le lit rocheux, sont formés de glace parfaitement bleue.

Dans la glace bulleuse se développe une texture feuilletée, alternance de bandes de glace bulleuse et claire. Nous présentons l'évolution du pourcentage de glace feuilletée et de glace bleue le long du profil (fig. 6). La densité de la foliation augmente avec la profondeur. Dans les 7 derniers mètres, la texture disparaît brutalement.

L'angle de la foliation avec l'horizontale varie avec la profondeur (fig. 7). L'augmentation n'est pas continue tout au long du profil. A côté d'une variation régulière, il existe deux exceptions. Dans ces deux cas, l'inclinaison est la même pour les 80 cm de l'échantillon.

b) Origine de la foliation : Ce phénomène a été observé depuis longtemps dans la glace de glacier. Agassiz (1842) pensait qu'elle était une conséquence de la stratification originelle du névé. Pour Tyndall (1859), c'est une forte compression qui provoquerait l'apparition d'une foliation perpendiculaire à la contrainte principale (Lliboutry, 1965, Tome 2, p. 612-614). Kamb (1962) a d'ailleurs observé une "étonnante mobilité" des bulles dans un échantillon en compression.

Dans le névé, la texture feuilletée est d'origine sédimentaire. Les différentes couches subissent l'influence de la pression et de la variation saisonnière de la température. La persistance de ces couches dans la glace serait à l'origine de la foliation dans la partie supérieure du glacier.

La stratification s'incline de près de 20° par rapport à l'horizontale entre 30 et 80 m de profondeur. Cette inclinaison pourrait s'expliquer par la déformation d'un élément de glace. En effet le plan de cisaillement

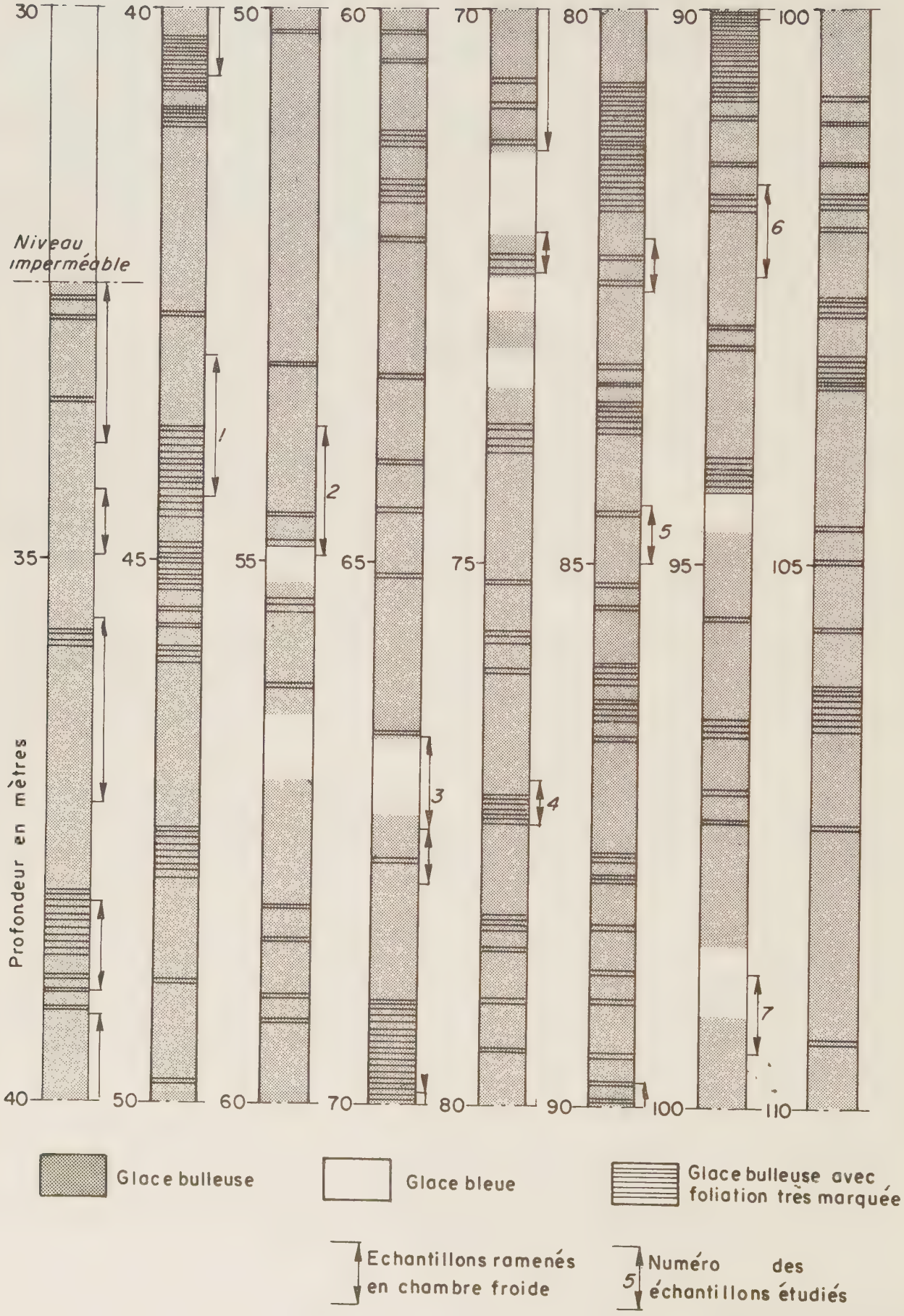


Fig. 5 - Stratigraphie du forage

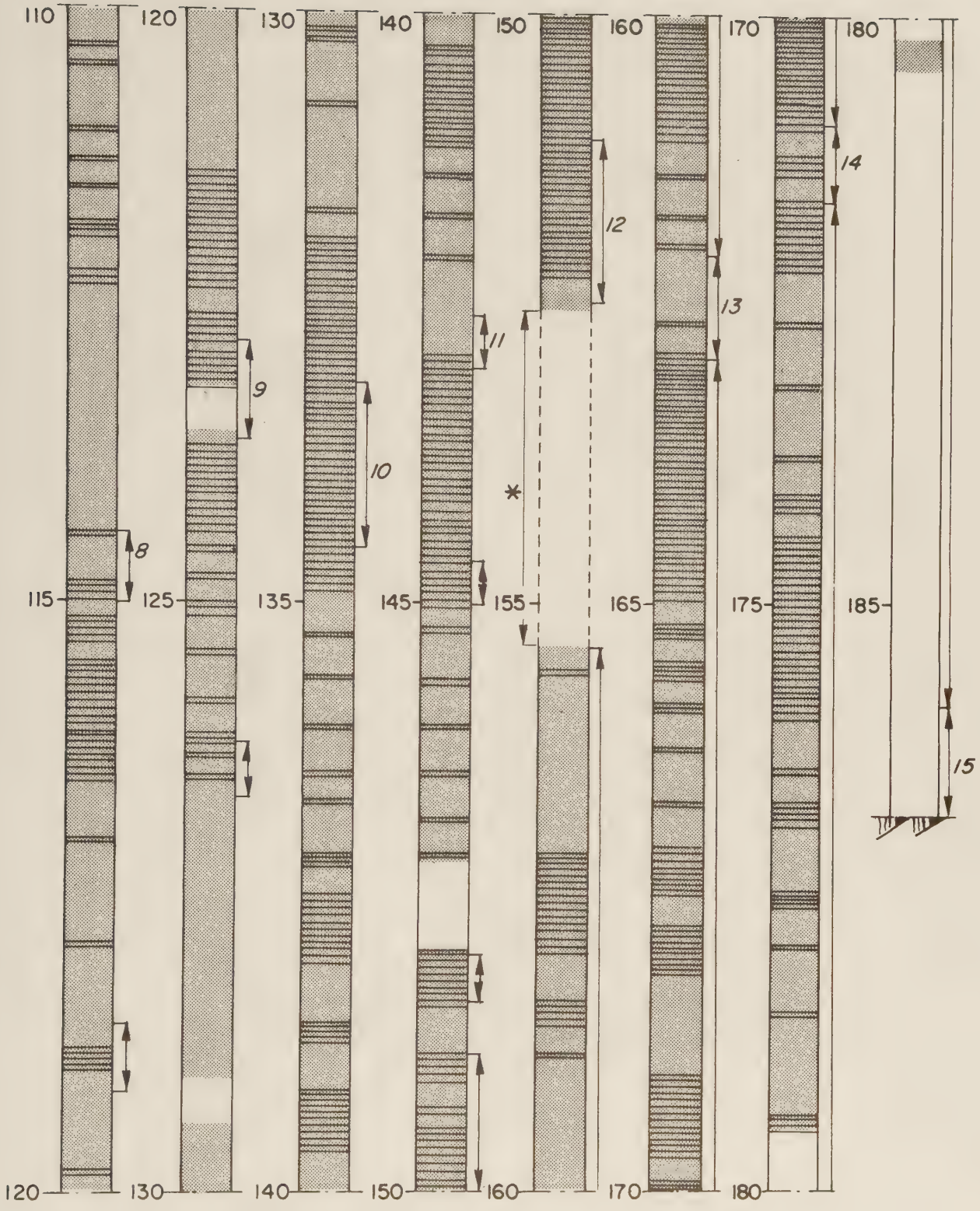


Fig. 5 - Stratigraphie du forage (suite)

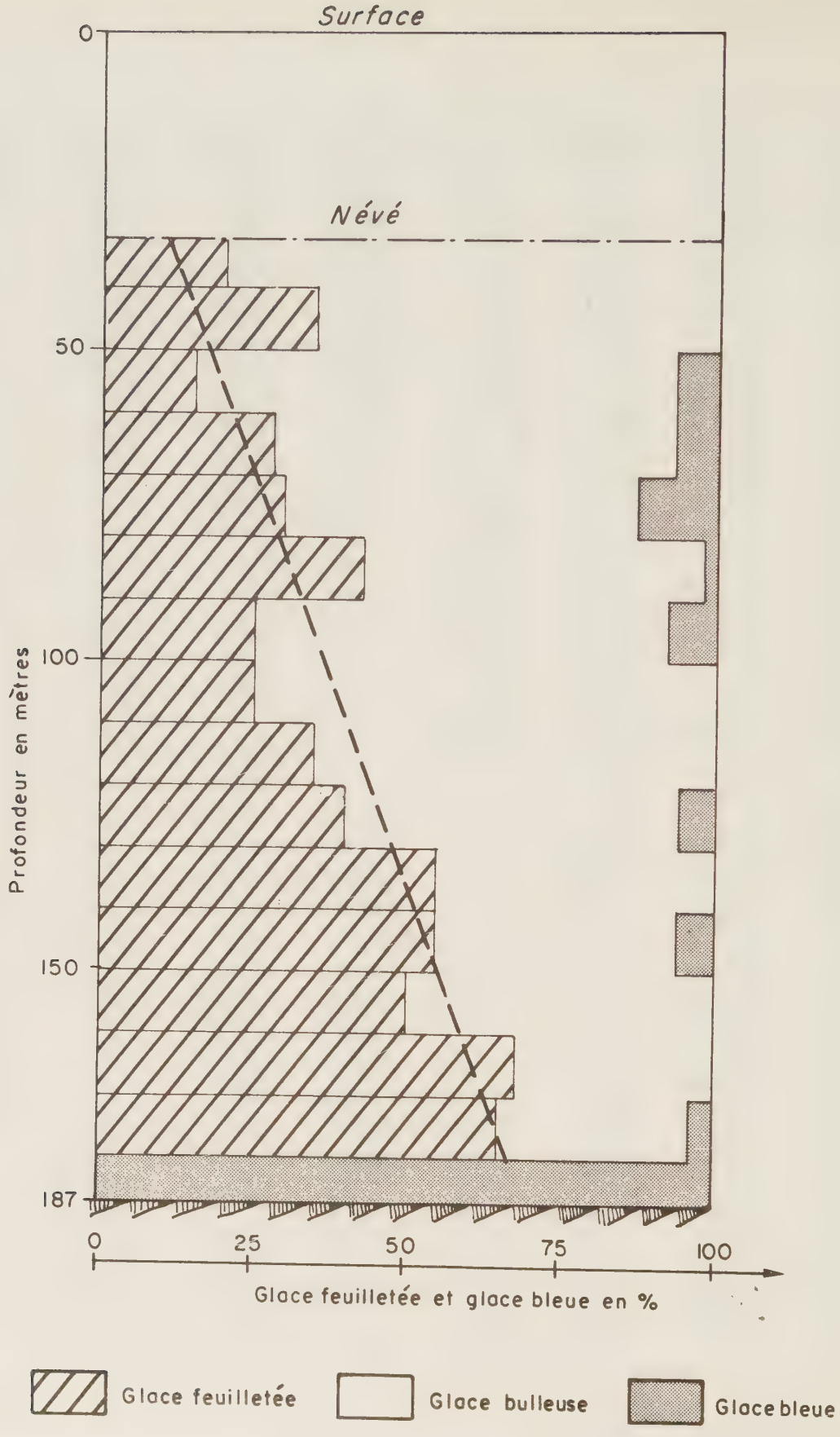


Fig. 6 - Pourcentage de glace feuilletée et de glace bleue en fonction de la profondeur

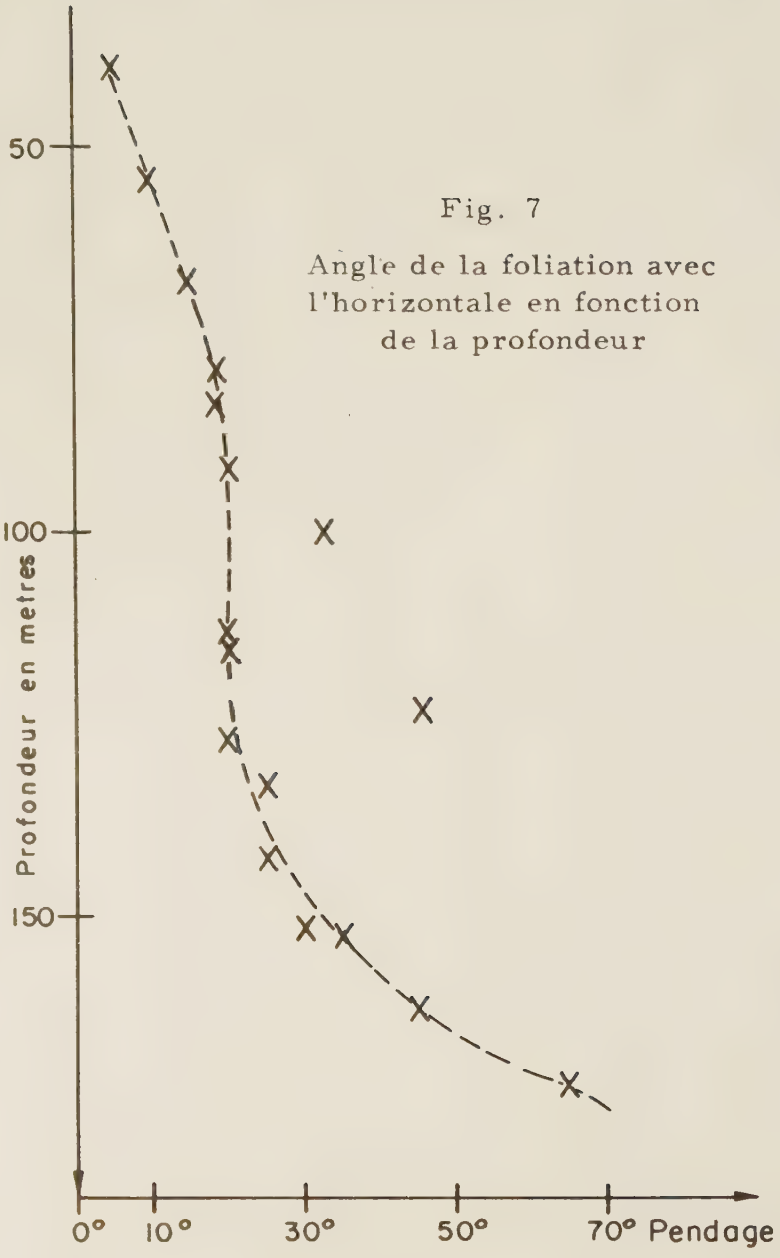


Fig. 7

Angle de la foliation avec l'horizontale en fonction de la profondeur

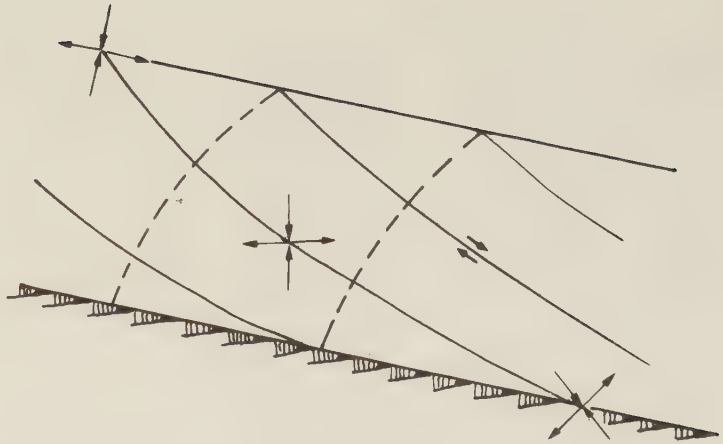


Fig. 8 - Lignes de glissement dans le cas d'un fluage de Nye - Fluage extensif

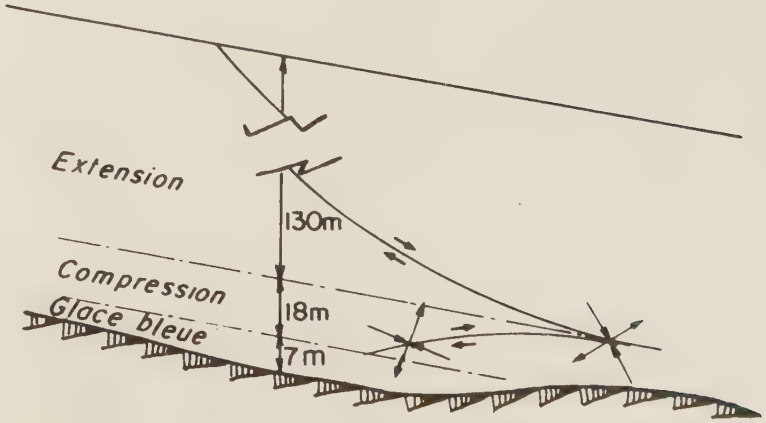


Fig 9 - Etat de contraintes possibles pour la Vallée Blanche

maximum n'est pas parallèle à la stratification à la base du névé (Petit 1972). Il s'ensuit une rotation vers l'aval du plan de foliation.

Nous pouvons aussi penser qu'il s'agit non d'une structure fossile mais d'une véritable schistosité. Supposons le glacier en extension ; les lignes de glissement pour un fluage de Nye (en assimilant la glace à un plastique parfait) forment deux réseaux de demi-cycloïdes orthogonales (fig. 8). En supposant que la foliation apparaisse dans le plan de compression maximum, la rotation théorique du plan de compression suit assez bien l'évolution réelle, à quelques exceptions près.

Entre 90 et 130 m le pendage de la foliation reste constant, avec deux anomalies à 99 et 123 m. Puis il augmente très rapidement et, après 162 m, dépasse 45°. Toute interprétation est sujette à caution car, en l'absence d'orientation du carottage, nous ne pouvons affirmer que la foliation n'a pas basculé de 90° à notre insu. Il est possible cependant que, pour les 18 m qui voient le plan de compression devenir subvertical, le glacier soit en compression (fig. 9). La foliation s'estompe progressivement après 176 m.

Remarquons qu'avec ce modèle la foliation est inclinée vers l'amont.

3 - 2 - 2 - Pétrographie

a) Méthode

α - Fabrication des lames minces

Dans chaque échantillon plusieurs lames minces ont été taillées. La majorité des lames sont perpendiculaires à l'axe de la carotte (elles sont ainsi pratiquement horizontales). Mais pour avoir la forme générale des cristaux nous avons préparé quelques lames verticales. Deux sections perpendiculaires voisines nous permettent d'avoir une idée sur l'agencement des grains. Remarquons cependant qu'une description complète nécessiterait 3 sections orthogonales.

Les lames sont polies avec du papier de verre. Dès qu'une petite série est fabriquée, elles sont photographiées entre polaroïds croisés, dans deux positions différentes, à 45° l'une de l'autre. Après un tirage noir et blanc, tous les cristaux sans exception sont ainsi repérés.

β - Précautions

Pour éviter de représenter sur le stéréogramme deux sections du même cristal, il nous faut savoir quelle distance minimum doit séparer deux lames minces. Nous verrons (§ b) que les cristaux sont légèrement aplatis dans un plan voisin du plan de foliation : l'espacement dépendra de l'inclinaison de la foliation par rapport à la section de coupe. Pour une lame taillée parallèlement à la foliation, Vallon (1968) propose un espacement minimum de 10 cm pour un échantillon de glace où l'aire moyenne des sections de cristaux est seulement de l'ordre de 2 cm^2, alors qu'un seul cristal a pu être suivi sur 3 cm.

Pour cette étude, nous ne disposions pas d'échantillons suffisamment importants, surtout entre 30 et 150 m, pour adopter une telle marge de sécurité. D'après les conditions énoncées ci-dessus, nous avons espacé les lames minces successives de 5 cm. Pour que l'orientation d'un cristal n'intervienne pas deux fois sur la même lame, les sections ayant des orientations très voisines (± 1 ou 2°) sont considérées comme des apophyses du même cristal, et sont éliminées.

γ - Etude des stéréogrammes

Les lames minces sont étudiées entre polaroïds croisés sur une platine universelle permettant l'étude de lames de 10 cm de diamètre. L'orientation des axes optiques est obtenue d'après la méthode décrite par Choumsky (1957). Les valeurs sont corrigées pour tenir compte de la réfraction air-glace (Langway, 1958), et sont reportées sur un réseau équiaréal de Schmidt.

La texture est mise en évidence par des courbes de densité. Un "calibre" circulaire, représentant une fraction de l'aire totale, est déplacé sur la surface du stéréogramme. Il est centré successivement sur les nœuds d'un quadrillage où est inscrit le nombre de points comptés à l'intérieur du calibre. Nous traçons ainsi des courbes d'égale densité (Ramsay, 1967).

Plusieurs méthodes sont possibles pour déterminer l'aire du calibre.

- Il peut être pris systématiquement égal à 1 % de l'aire totale. En fonction du nombre total de points, les densités ne seront pas toutes statistiquement valables. C'est pourquoi, dans certains cas, il faut éliminer les courbes de densité les plus faibles. En particulier, ce n'est qu'à partir d'une population de plus de 500 individus que la courbe 2 % des points est significative. Pour 100 points, la première courbe significative est 4 % (Vallon 1967).

- Nous pouvons encore calculer l'aire du calibre d'après le nombre total de points. Cette méthode a été proposée par Schmidt et utilisée par Kamb (1959). Elle offre l'avantage de ne donner que des courbes significatives. C'est celle que nous emploierons.

Soit p le rapport de l'aire du calibre à l'aire totale. Si la répartition des points est aléatoire, la probabilité de trouver X points d'une population N dans le calibre est :

$$P(X) = \frac{N!}{X!\,(N-X)!}\, p^{X} (1-p)^{N-X}$$

L'espérance mathématique de cette loi binômiale est E=Np. Sa variance vaut $\sigma^2 = Np(1-p)$.

Comme p est très petit, et N grand, la distribution binômiale tend vers une loi normale. Nous dirons qu'il existe une orientation préférentielle si le nombre de points E' à l'intérieur du calibre est plus grand, de k fois l'écart type, que celui de la répartition aléatoire.

$E' \geq E + k\,\sigma$ (nous prendrons un seuil à 5 % soit k = 2)

Pour E' = 2 E, le premier contour (densité $\geqslant$ 2 % des points dans 1 % de l'aire) sera donné par :

$$2E \geqslant E + 2\sigma$$

soit

$$p = \frac{4}{N+4}$$

Le calcul a été fait pour différentes valeurs de N (tableau 1).

N	p	diamètre du calibre (cm) pour un stéréogramme standard de 20 cm de $\varnothing$
50	0,0740	5,45
60	0,0625	5
70	0,0540	4,65
80	0,0476	4,36
90	0,0425	4,13
100	0,0384	3,92
110	0,0350	3,74
120	0,0322	3,6
130	0,0298	3,45
140	0,0277	3,33
150	0,0259	3,22
200	0,0196	2,8
400	0,0099	2

Le raisonnement ci-dessus n'est rigoureusement valable que pour la première courbe d'isodensité. Il faudrait le renouveler à chaque étape. En fait quand la densité maximum n'est pas très forte, le calcul nous donne une variation de l'aire du calibre pratiquement insignifiante. En revanche, quand presque tous les points sont rassemblés dans une petite zone nous utilisons deux calibres différents.

δ - Taille des grains

Pour toutes les lames minces une valeur moyenne de l'aire occupée par chaque section de cristal a été calculée en divisant l'aire totale par le nombre de cristaux. Nous ne considérerons dans ce décompte que la partie homogène de la lame : il ne sera pas tenu compte des petites régions microgrenues que l'on peut observer sur certaines lames.

ε - Forme des grains

La mise en évidence de la forme plus ou moins complexe d'un cristal est un problème délicat. Nous nous sommes inspirés de la méthode utilisée par Vallon, (1967).

Un calibre formé de trois segments de droites parallèles, d'une longueur de 7 à 9 cm suivant les dimensions de la lame mince, espacés de 2 cm, est déplacé

sur une photo de la lame. Nous relevons tous les 10° le nombre d'intersections des limites de cristaux avec les droites. Une longueur moyenne des grains est ainsi définie pour chaque direction, ce qui permet de mettre en évidence un éventuel allongement (ou aplatissement). Avec les différentes longueurs moyennes, nous calculons une aire moyenne.

b) Résultats

Les résultats ci-dessous sont présentés en bloc pour chaque profondeur étudiée. Chaque carotte (ou ensemble de carottes) correspondant à un niveau donné sera numérotée (1, 2, 3...). Nous effectuerons ensuite une comparaison générale des résultats en fonction de la profondeur.

Remarques : Sur les stéréogrammes, les angles ont pour origine le repère d'orientation et sont comptés positivement dans le sens direct. Le mot "avant" désignera la partie du stéréogramme située entre le pôle de la projection et le repère d'orientation.

Nous appellerons linéation, l'alignement apparent formé par les joints de grains de cristaux voisins. Il ne s'agit bien sûr pas d'une véritable linéation, mais d'une intersection de "plans" de joints de grains avec le plan de la lame mince.

ECHANTILLON N° 1

Profondeur : 43 à 45 m
Fig. 10, 11, 12, 13

De 30 à 45 m les cristaux sont très petits (1 à 5 mm^2 de section) de forme simple et régulière. Cet échantillon comporte deux types de glace, l'une bulleuse, l'autre bleue.

• Glace bulleuse

- Résultats

Même dans les bandes blanches les bulles sont assez peu nombreuses. Un très petit nombre d'entre elles est allongé parallèlement à la direction du repère. Le pendage de la foliation est faible (environ 10°). Aucune linéation n'apparait dans cette partie. Le stéréogramme est représenté sur la figure 10.

Le large maximum sub-vertical observé n'est pas sans rappeler la texture du névé du Col du Midi étudié par Vallon d'après le forage de 1963, bien que son intensité soit différente (15 % pour le névé, entre 5 et 8 % pour la glace que nous étudions).

Par contre, certains résultats obtenus par Vallon (1967) concernant la glace du Col du Midi sont différents des nôtres. Il avait observé la disparition immédiate de la texture du névé et l'existence de plusieurs directions préférentielles. De plus, en 1963, une grande différence de taille a été mise en évidence pour les cristaux d'une même lame, alors qu'elle est très faible pour le forage de 1971.

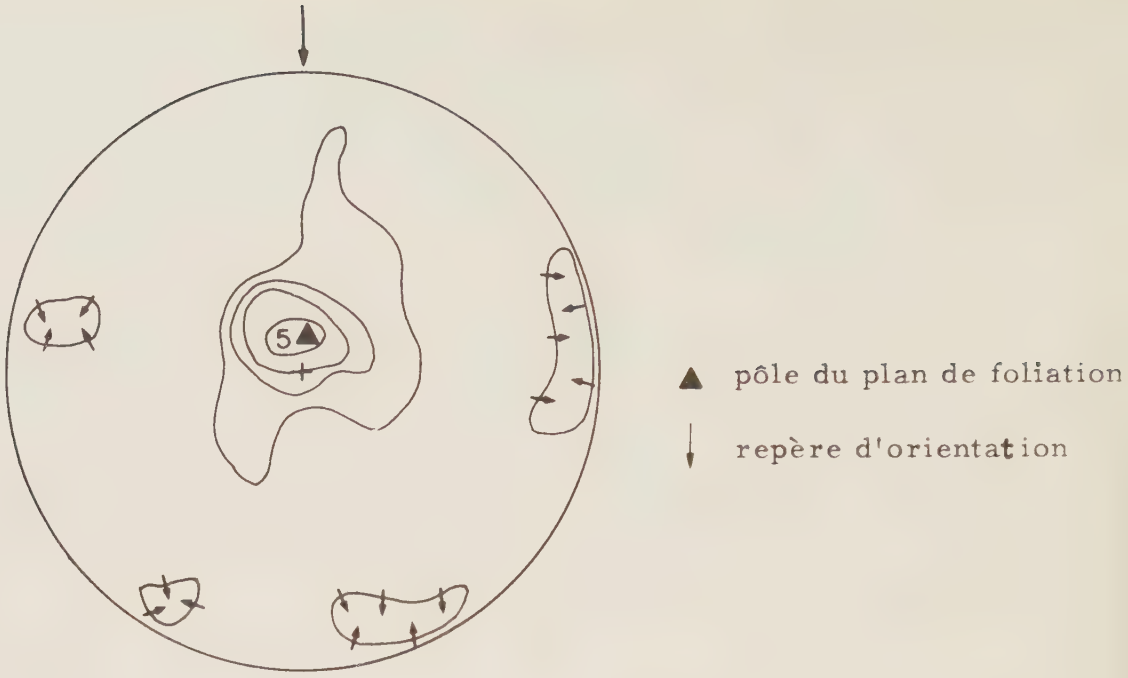


Fig. 10 - Orientation des axes optiques des cristaux de glace sédimentaire

Profondeur : 43, 80 m
1 lame mince horizontale - 200 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 2 % de l'aire
Contours à 0, 2, 3, 4, 5 % des points dans 1 % de l'aire

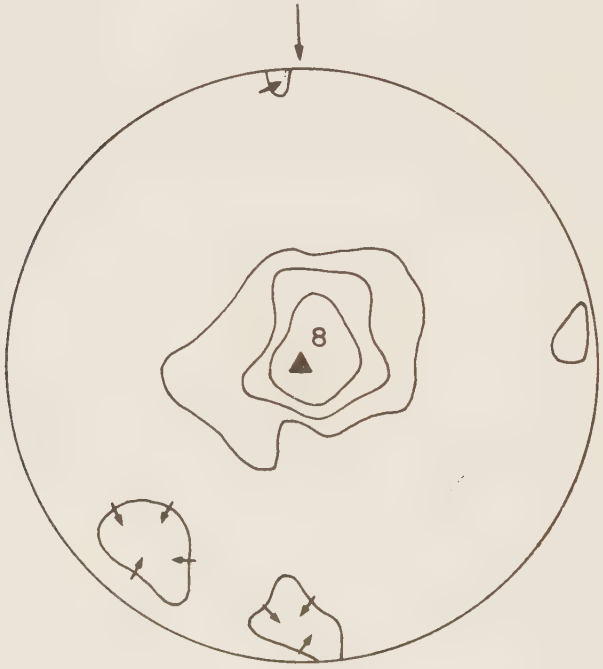


Fig. 11 - Profondeur : 44, 45 m

1 lame mince - 200 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 2 % de l'aire
Contours à 0, 2, 4, 6 % des points dans 1 % de l'aire

D'autres lames minces ont été effectuées dans les mêmes conditions. En particulier, une lame taillée dans le plan de foliation a donné un maximum centré sur le pôle du stéréogramme (fig. 11).

- Explications possibles

La texture verticale du névé peut être expliquée en faisant intervenir les deux grandeurs qui la contrôlent principalement : la température et la pression.

a - Un gradient thermique vertical, dû aux fluctuations saisonnières de température, se fait sentir sur une dizaine de mètres. Il en résulterait une recristallisation selon deux directions préférentielles, suivant que l'axe senaire ou un des axes binaires est parallèle au gradient : axe optique parallèle ou perpendiculaire au gradient (Choumsky, 1957 b). Remarquons cependant que Yosida et Kojima (1954) ne trouvent qu'une direction préférentielle : l'axe senaire parallèle au gradient.

b - Le deuxième facteur important est le déviateur des contraintes. Il existe en effet dans le névé une certaine tension verticale, due au poids des couches supérieures, dont l'effet se fait sentir plus bas que les températures.

Dans deux théories thermodynamiques, celle de Kamb semble le plus près de la réalité dans le cas particulier de la compression uniaxiale. Son calcul montre que les cristaux soumis à une compression uniaxiale faible ont tendance à aligner leur axe optique parallèlement à la direction de compression.

Sans faire appel à ces théories, nous pouvons trouver à cela une explication géométrique simple. En effet un échantillon soumis à une compression voit ses plans de glissement se déformer comme le montre la figure 12. Les plans tendent à se disposer horizontalement, l'axe optique est donc vertical (Schmidt et Boas, 1968). Ceci a été vérifié pour le zinc et le cadmium ; sous faible contrainte l'axe [0001] est parallèle à l'axe de compression.

Les résultats de 1963 pour le névé sont en bon accord avec ce qui précède. Les stéréogrammes obtenus avec le forage 1971 permettent de penser que la transition névé-glace n'est pas brutale du point de vue texture.

Glace bleue

Cet échantillon renfermait une petite bande de glace bleue de deux centimètres d'épaisseur environ. Une lame mince y a été taillée, parallèlement au plan de foliation. La taille moyenne des cristaux est supérieure à la normale en cet endroit : 0,5 cm^2 . Plusieurs directions de linéation sont visibles. Les linéations les plus nettes sont à 70° du repère, d'autres existent à 20° et 160°, ces trois directions sont représentées sur le stéréogramme (fig. 13).

Les deux directions préférentielles font entre elles un angle de 40°. Remarquons que la direction 160° est approximativement un axe de symétrie pour la texture. Notons enfin le décalage de 20° entre l'alignement des deux maximums et la direction de la foliation.

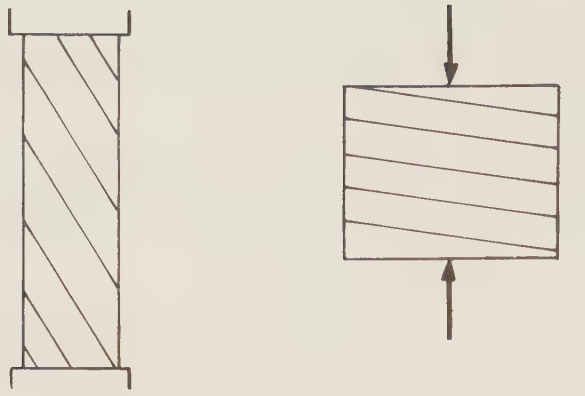


Fig. 12 - Déformation des plans de glissement dans une compression uniaxiale

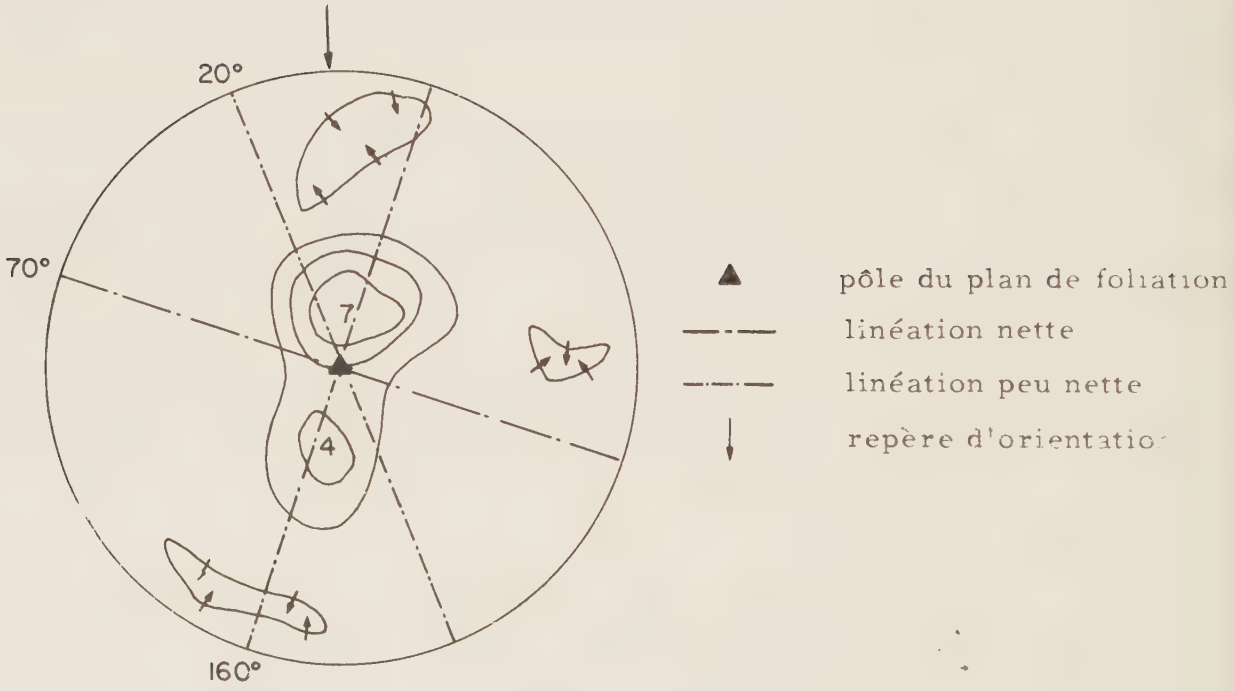


Fig. 13 - Profondeur : 44,40 m

1 lame mince - 200 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 2 % de l'aire
Contours à 0, 2, 4, 6 % des points dans 1 % de l'aire

La stratigraphie permet de situer la formation de cette bande bleue à la fin de l'été 1962 (Petit, 1972). Un processus de fonte et regel pourrait expliquer l'absence de bulles et la taille anormale des cristaux, à cette profondeur. Il est en effet peu probable que, dans ce cas, il s'agisse d'une bande bleue tectonique car cette glace a une histoire très courte, et d'autre part l'intensité des contraintes est faible près de la surface. Dans ces conditions on s'explique mal les deux directions préférentielles.

ECHANTILLON N° 2

Profondeur : 54,20 à 55 m
Fig. 14

Une lame mince a été taillée à 54,25 m dans un endroit moyennement bulleux. Le pendage de la foliation est d'environ 15°. La taille des sections de cristaux est de 0,5 à 1 cm^2. Les bulles, nombreuses, sont situées pour la plupart dans les cristaux ; cependant quelques unes se trouvent entre les grains. Nous distinguons également quelques bulles très aplaties provenant de fleurs de Tyndall. Il existe une linéation nette à 60° ; deux lignes, moins nettes, à 10° et 110°. Elles sont représentées sur le stéréogramme (Fig. 14). La texture n'est pas sans rappeler celle de la bande bleue de l'échantillon 1 : nous retrouvons les deux maximums de part et d'autre du pôle de la foliation. Ils sont écartés de 50°. Notons que le maximum le plus important est toujours situé à l'avant du pôle de foliation et à une distance angulaire de 15°.

ECHANTILLON N° 3

Profondeur : 66,70 à 67,50 m
Fig. 15, 16, 17, 18

Le haut de cette carotte est constitué par une trentaine de centimètres de glace bleue, en deux zones, séparées par une bande bulleuse de 4 à 5 cm. Le bas est composé de glace bulleuse (Fig. 15).

- Glace bleue

Sur la lame taillée dans la glace bleue, les cristaux sont de dimensions très variables : leurs sections vont de quelques millimètres carrés à 4 cm^2 (taille moyenne 0,4 cm^2). Il existe une linéation très nette à 100° de la foliation. Forme et taille moyenne des grains sont représentés figure 16 ; (la courbe est obtenue à partir d'une moyenne mobile sur 3 points). Il n'y a pas d'allongement significatif. Le stéréogramme montre quatre maximums, les trois plus importants ont une intensité de 3 %.

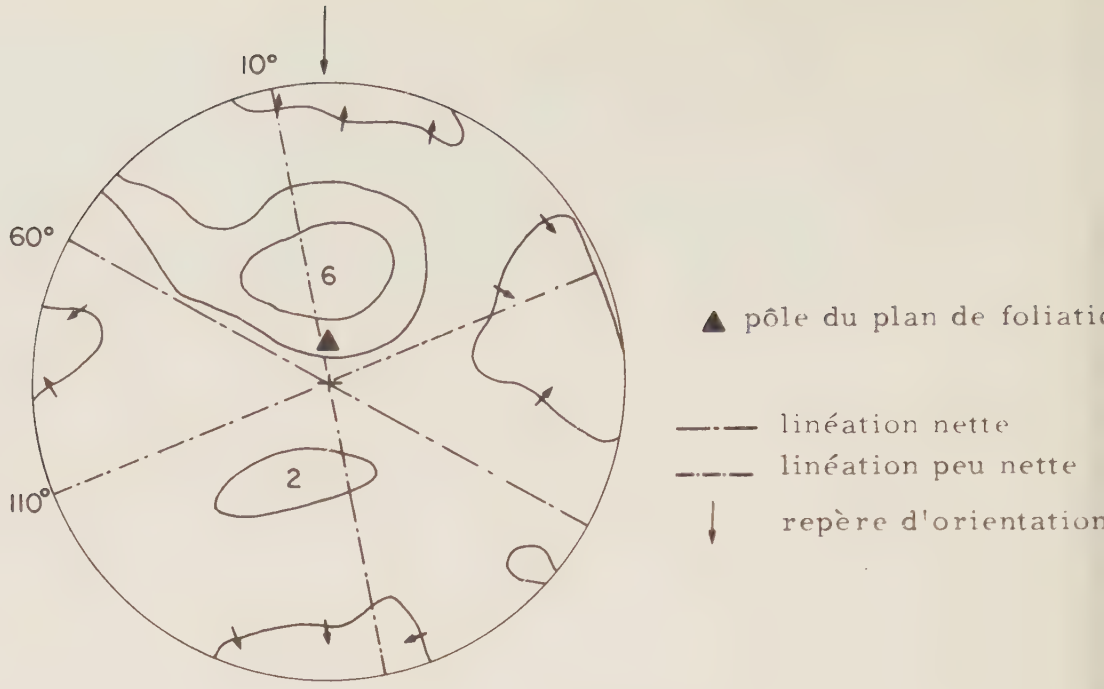


Fig 14 - Profondeur : 54.25 m

1 lame mince horizontale - 133 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 3 % de l'aire
Contours à 0, 2, 4 % des points dans 1 % de l'aire

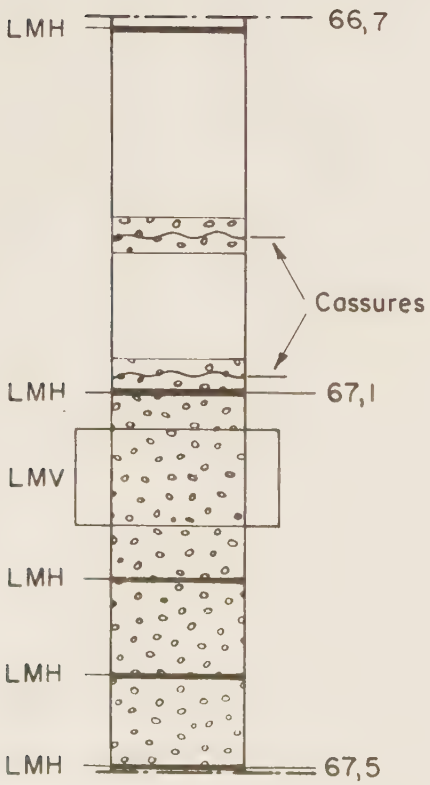


Fig. 15 - Echantillon de glace n° 3

glace bulleuse

glace bleue

66,7 profondeur en mètres

LMH / LMV emplacement des lames minces horizontales ou verticale

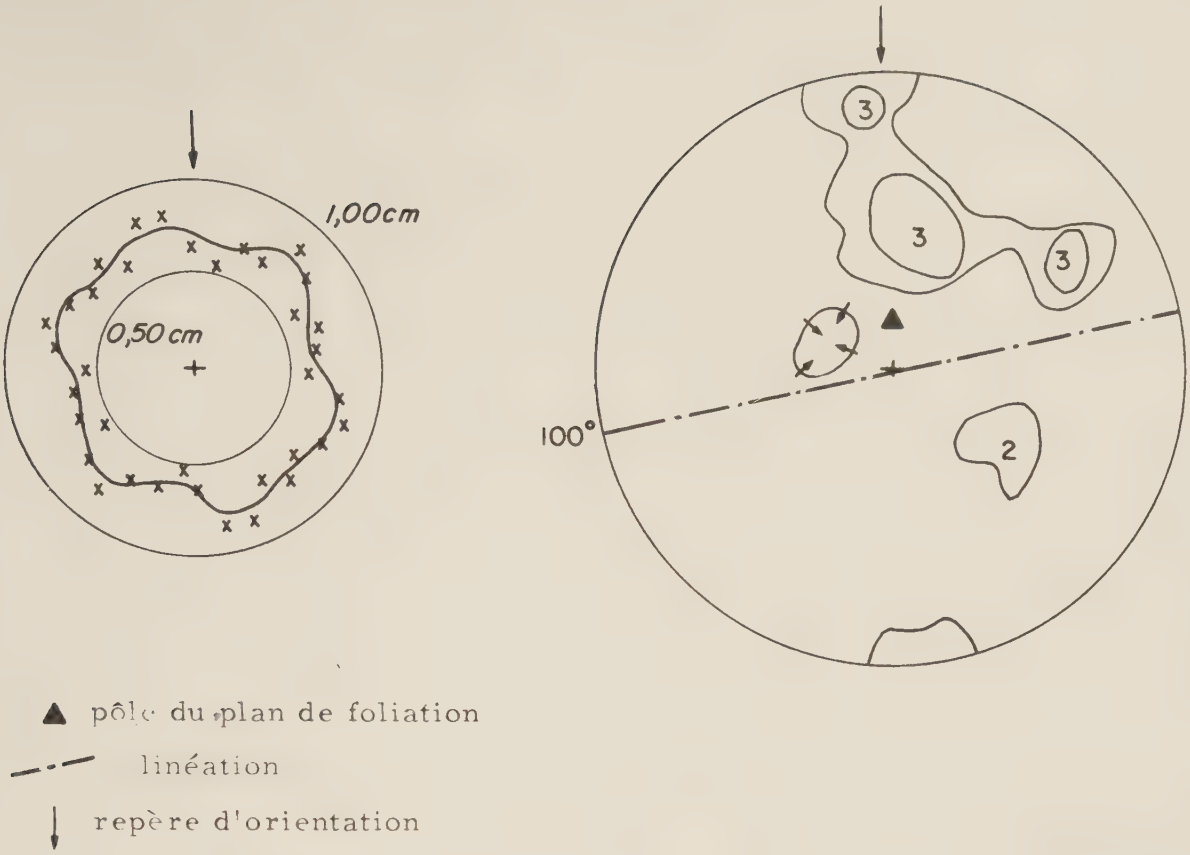


Fig. 16 - Morphologie et orientation des axes optiques des cristaux de glace

Profondeur : 66,70 m

1 lame mince horizontale - 151 cristaux

Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 3 % de l'aire

Contours à 0, 2, 3 % des points dans 1 % de l'aire

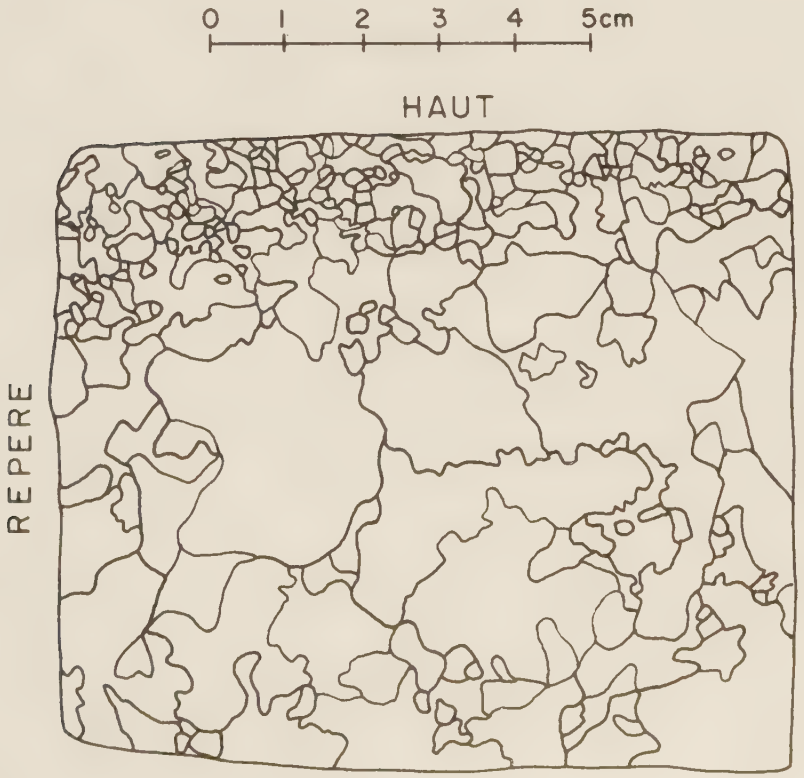


Fig. 17

Profondeur 67,15 à 67,24 m

Contour des cristaux d'une lame mince verticale parallèle à la ligne de plus grande pente de la foliation

• Glace bulleuse

- Juste en dessous de la bande bleue se trouve une zone de cristaux plus petits (2 à 5 mm^2 de section). La teneur en bulles de cette partie n'est pas très importante. Une linéation apparait vers 120°. Les cristaux sont morphologiquement identiques à ceux qui forment les premiers mètres de glace. Ils possèdent également le même type de texture verticale.

- Ensuite, pratiquement sans transition, comme le montre le dessin de la lame verticale (Fig. 17), se trouvent de gros cristaux de 1 à 6 cm^2. Il y a beaucoup de grosses bulles à l'intérieur des cristaux, quelques unes aux joints de grains. Le stéréogramme (Fig. 18) reprèsente la texture de 3 lames minces. Notons que, pour la première fois, apparait le "losange" observé par Rigsby et Kamb en zone d'ablation. L'écart angulaire entre les deux sommets de la grande diagonale est de 90°. Les sommets de la petite diagonale sont distants de 70°. Deux maximums de ce stéréogramme coïncident exactement avec ceux de la bande bleue.

La distance angulaire ci-dessus n'est pas comparable aux résultats de Rigsby, Kamb et Vallon qui font état de 45° et 80°, à ±5°, pour la petite et la grande diagonale du losange.

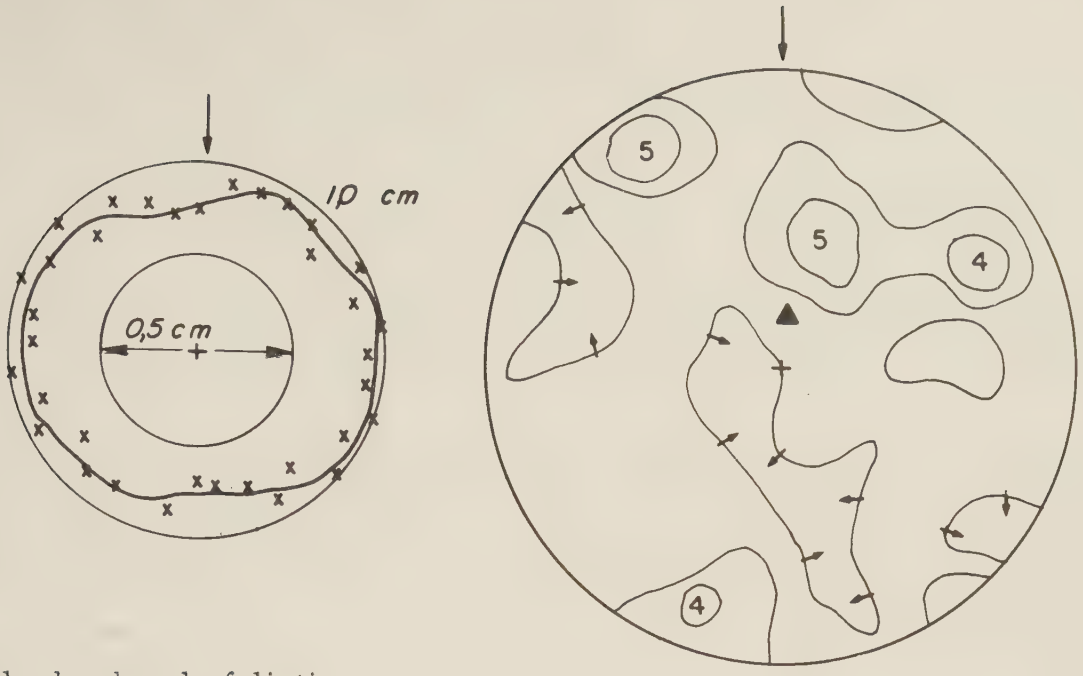
ECHANTILLON N°4

Profondeur : 77 à 77, 40 m
Fig. 19

Les cristaux ont une section de l'ordre de 2 cm^2. Leur forme devient plus complexe ; certains ont tendance à se ramifier. Nous pouvons remarquer sur la figure 19 qu'il existe un léger allongement des cristaux parallèlement au repère. Les bulles sont toujours aussi nombreuses et elles se situent en grande partie à l'intérieur des grains.

Le stéréogramme de cet échantillon, obtenu avec trois lames minces, est encore différent de tous ceux obtenus jusqu'à cette profondeur (Fig. 19). Il a cependant un point commun avec ceux de l'échantillon précédent : la direction du maximum d'orientation proche du pôle de foliation est exactement la même.

Bien que les textures ne soient pas semblables, il existe donc une certaine continuité dans les orientations. A 40° de la verticale et à 340° du repère, se trouve une direction préférentielle fixe.



▲ pôle du plan de foliation

repère d orientation

Fig. 18 - Profondeur : 67, 30 à 67, 50 m

3 lames minces horizontales - 111 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 3 % de l'aire
Contours à 0, 2, 4 % des points dans 1 % de l'aire

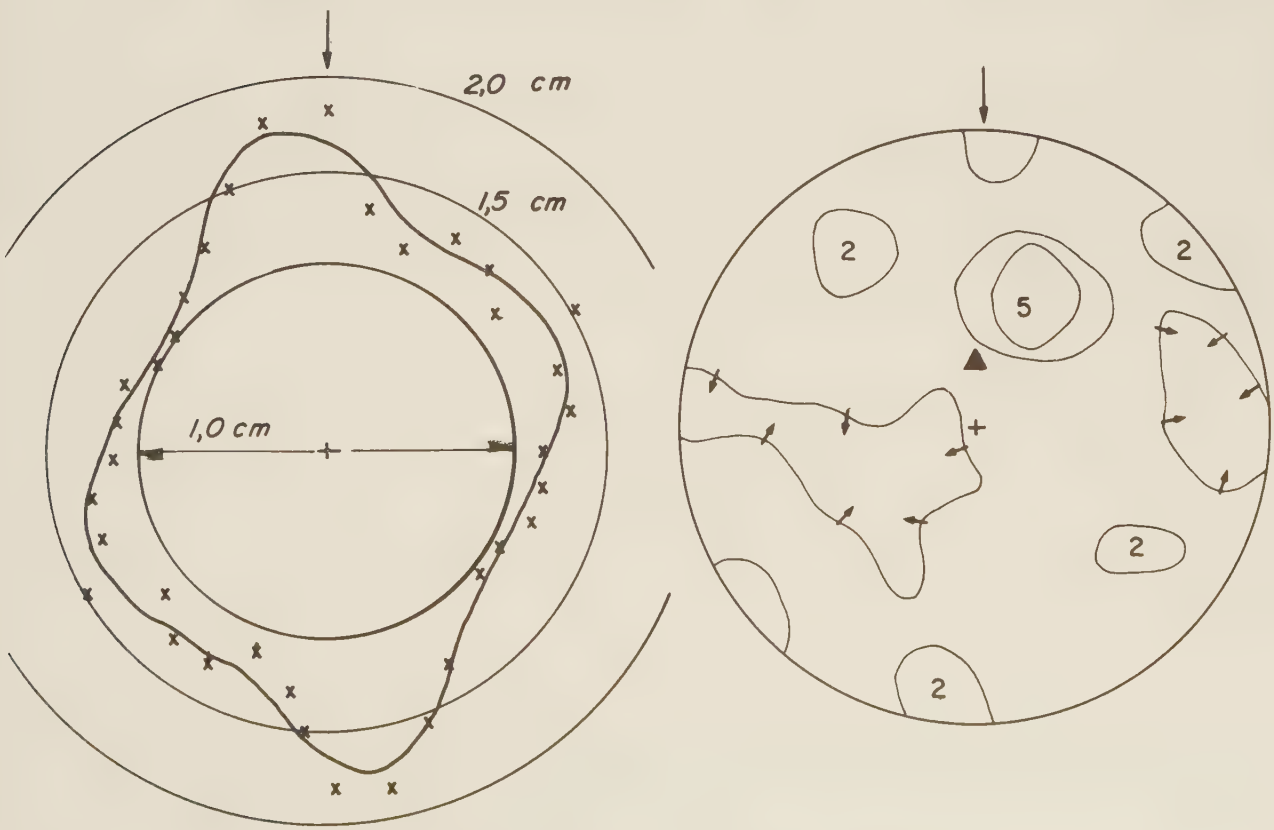


Fig. 19 - Profondeur : 77, 10 à 77, 45 m

4 lames minces horizontales - 142 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 3 % de l'aire
Contours à 0, 2, 4 % des points dans 1 % de l'aire

ECHANTILLON N°5

Profondeur : 84,50 à 84,90 m
Fig. 20

A cette profondeur les cristaux sont légèrement plus gros que ceux des couches supérieures, et ont pratiquement tous la même taille (section moyenne 2,5 cm^2).

a - Dans une zone où, à l'œil nu, la carotte apparait parfaitement homogène, nous pouvons remarquer sur une lame mince horizontale la trace d'une strate de cristaux très petits (de l'ordre du millimètre carré de section). Cette strate n'a que quelques mm d'épaisseur. Elle fait un angle de 70° avec la direction du repère. Son pendage n'a pu être déterminé car elle était absente sur la lame verticale voisine. Son inclinaison n'est donc pas très importante, elle doit être du même ordre de grandeur que la foliation, soit environ 25° par rapport à l'horizontale.

Il existe quelques bulles allongées parallèlement à la bande de petits cristaux. Elles ne sont pas très nombreuses et sont disséminées aux joints de grains et dans les cristaux, quelle que soit leur orientation cristallographique. Elles n'ont donc pas la même origine que les bulles allongées, remarquées jusqu'à cette profondeur, qui provenaient de l'évolution de figures de Tyndall.

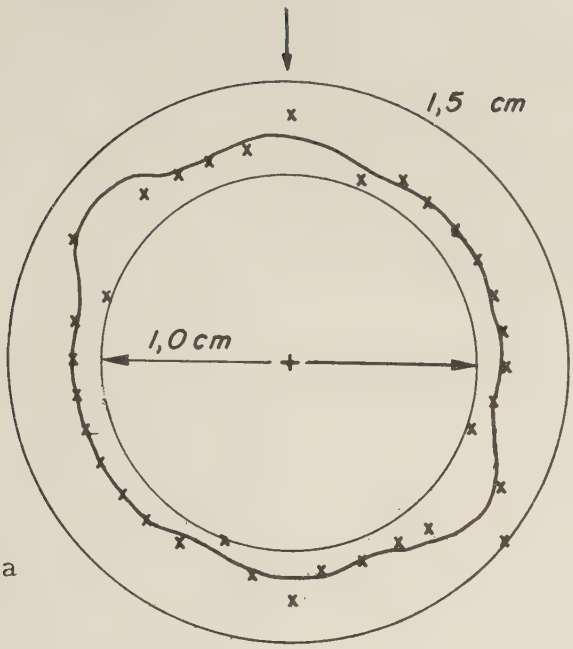
b - Par contre, une lame verticale recoupant une strate sans bulle de 4 cm d'épaisseur au milieu de la glace bulleuse, ne montre aucune discontinuité dans la taille ou la forme des cristaux. Ceci a déjà été remarqué par Kamb sur le Blue Glacier.

c - Des mesures d'allongement sur les lames horizontales ont donné les résultats reproduits figure 20 a. Aucun aplatissement caractéristique n'apparaît. La texture de cet échantillon est représentée sur la figure 20 b. Les deux directions qui déterminent la grande diagonale du losange forment entre elles un angle de 90°, les deux autres un angle de 70°. Par rapport à l'échantillon précédent le losange a tourné de 90°.

ECHANTILLON N ° 6

Profondeur : 91,70 à 92,50 m
Fig. 21

Les cristaux de cet échantillon ont une section moyenne de 3 cm^2. Certains sont très gros et atteignent 8 fois l'aire moyenne. Ces cristaux ont des contours réguliers mais présentent des apophyses. Remarquons (Fig. 21) un certain allongement des cristaux dans la direction 110°. Sur une lame mince horizontale, également à 110° du repère, existe une ligne de très petits cristaux.



.20 a

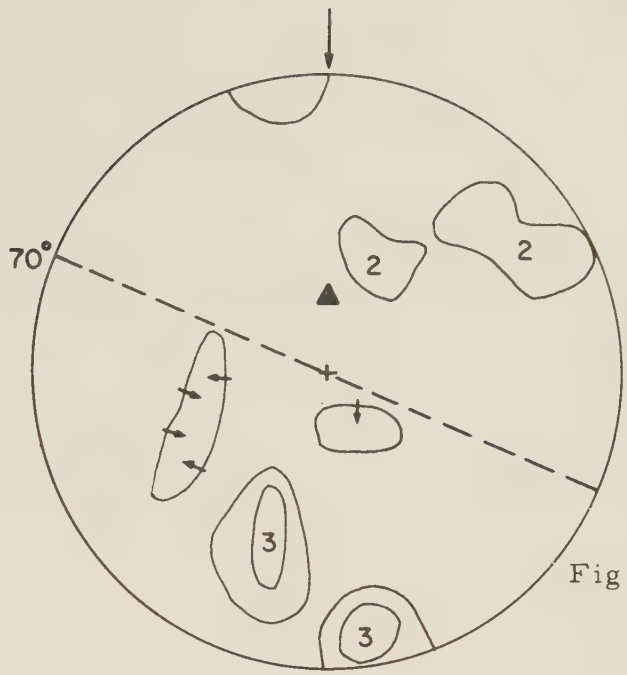


Fig. 20 b

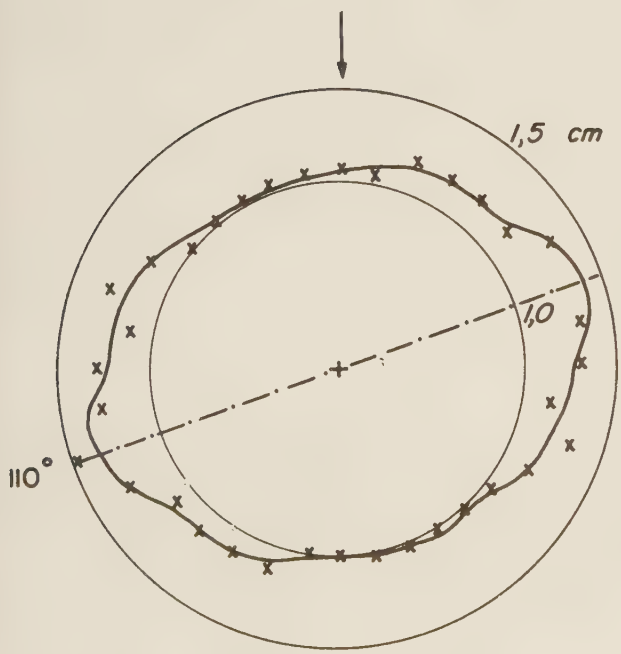
Fig. 20 - Profondeur : 84,55 à 84,95 m
5 lames minces horizontales - 140 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 3 % de l'aire
Contours à 0, 2, 3 % des points dans 1 % de l'aire

▲ pôle du plan de foliation

↓ repère d'orientation

direction d'allongement maxi.

direction d'une ligne microgrenu



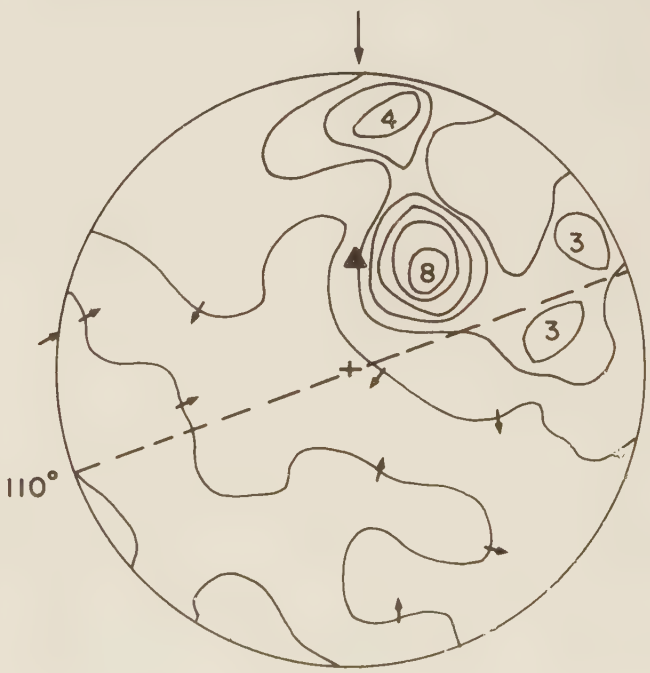


Fig. 21 - Morphologie et orientation des axes optiques des cristaux de glace

Profondeur : 91,70 à 92,45 m

5 lames minces horizontales - 106 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 3 % de l'aire
Contours à 0, 2, 3, 4, 6, 8 % des points dans 1 % de l'aire

Le stéréogramme de cet échantillon (Fig. 21) montre quatre directions préférentielles ; la plus importante est la plus proche du pôle du plan de foliation. Cette direction préférentielle est exactement la même que pour les échantillons précédents, mais elle est plus nette (8 % des points dans 1 % de l'aire). Remarquons que le pendage de la foliation n'a cessé d'augmenter (de 15 à 30°), alors que cette direction d'orientation préférentielle reste fixe. Sur la Mer de Glace un phénomène analogue a été observé (Vallon, 1967).

ECHANTILLON N°7

Profondeur : 98, 70 à 99, 50 m
Fig. 22, 23

La taille des grains est encore élevée pour cet échantillon : 3, 2 cm^2 de moyenne. Les bulles sont très clairsemées : 1 à 4 par cm^3 .

a - Il existe dans cet échantillon une mince zone à petits cristaux d'environ 5 mm^2 de section. Sur la lame mince horizontale nous pouvons voir une linéation dans la direction du repère. L'orientation de ces cristaux est présentée sur le stéréogramme, figure 23.

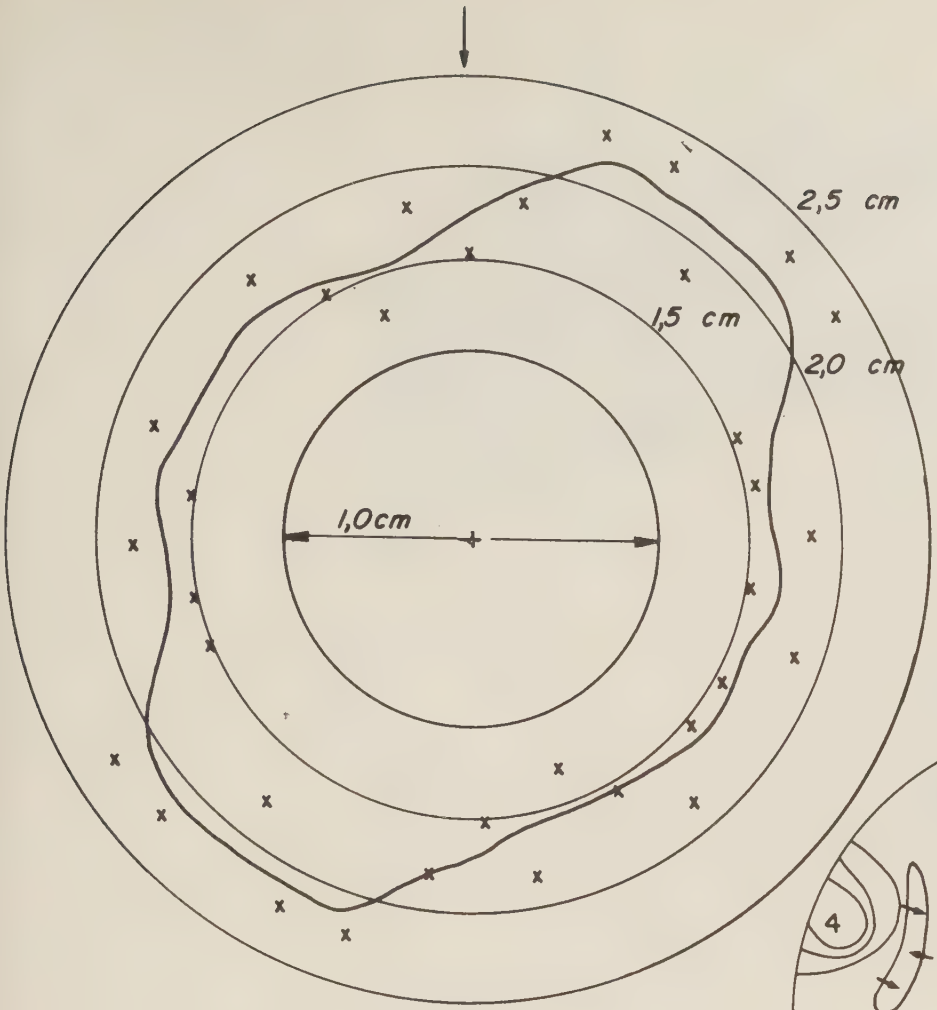
b - Le stéréogramme des gros cristaux de cet échantillon ainsi que leur morphologie sont représentés sur la figure 22. Les deux maximums latéraux font chacun un angle de 60° avec le maximum central. Ce dernier maximum se retrouve sur le stéréogramme des petits cristaux.

ECHANTILLON N°8

Profondeur : 114, 50 à 115 m
Fig. 24, 25

Dans cette échantillon se trouve un certain nombre de zones formées de très petits cristaux. La figure 24 représente les cristaux de deux lames minces voisines, horizontale et verticale. Les plans de cristaux microgrenus (pendage 20 à 25°) sont à peu près parallèles aux plans de foliation (pendage 20°) sur la lame mince verticale. La trace horizontale des plans de cristaux microgrenus fait 100° avec la direction du repère, donc 10° avec la trace de la foliation.

Les gros cristaux ont une section moyenne de 2, 5 cm^2 . Le stéréogramme (fig. 25) présente à la fois l'orientation des gros cristaux (cercles) et des cristaux microgrenus (points). Les courbes d'égale densité ne tiennent pas compte de la différence de taille.

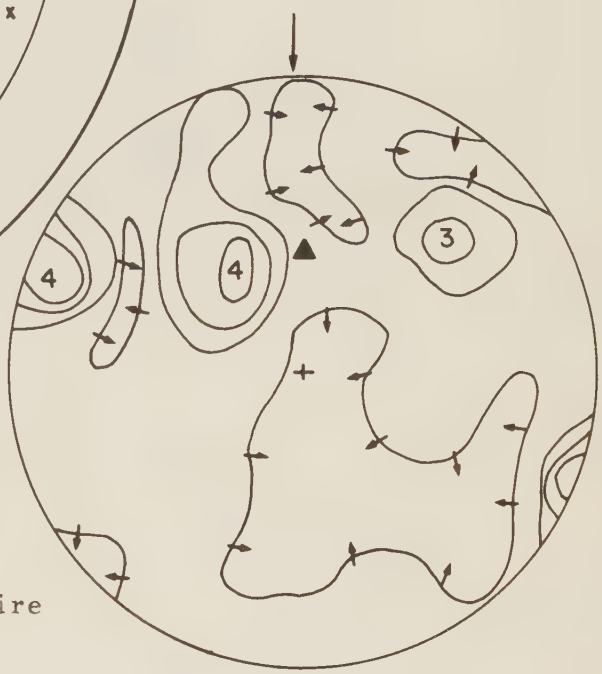


▲ pôle du plan de foliation

ligne microgrenue

linéation

repère d'orientation



ig. 22 - Profondeur : 98,7 à 99,3 m

lames minces horizontales - 126 cristaux
rojection de l'hémisphère supérieur - calibre
% de l'aire
ontours à 0, 2, 3, 4 % des points dans 1 % de l'aire

g. 23 - Profondeur : 99,50 m

ame mince horizontale - 200 cristaux
ojection de l'hémisphère supérieur - calibre
% de l'aire
ntours à 0, 2, 3, 4 % des points dans 1 %
l'aire

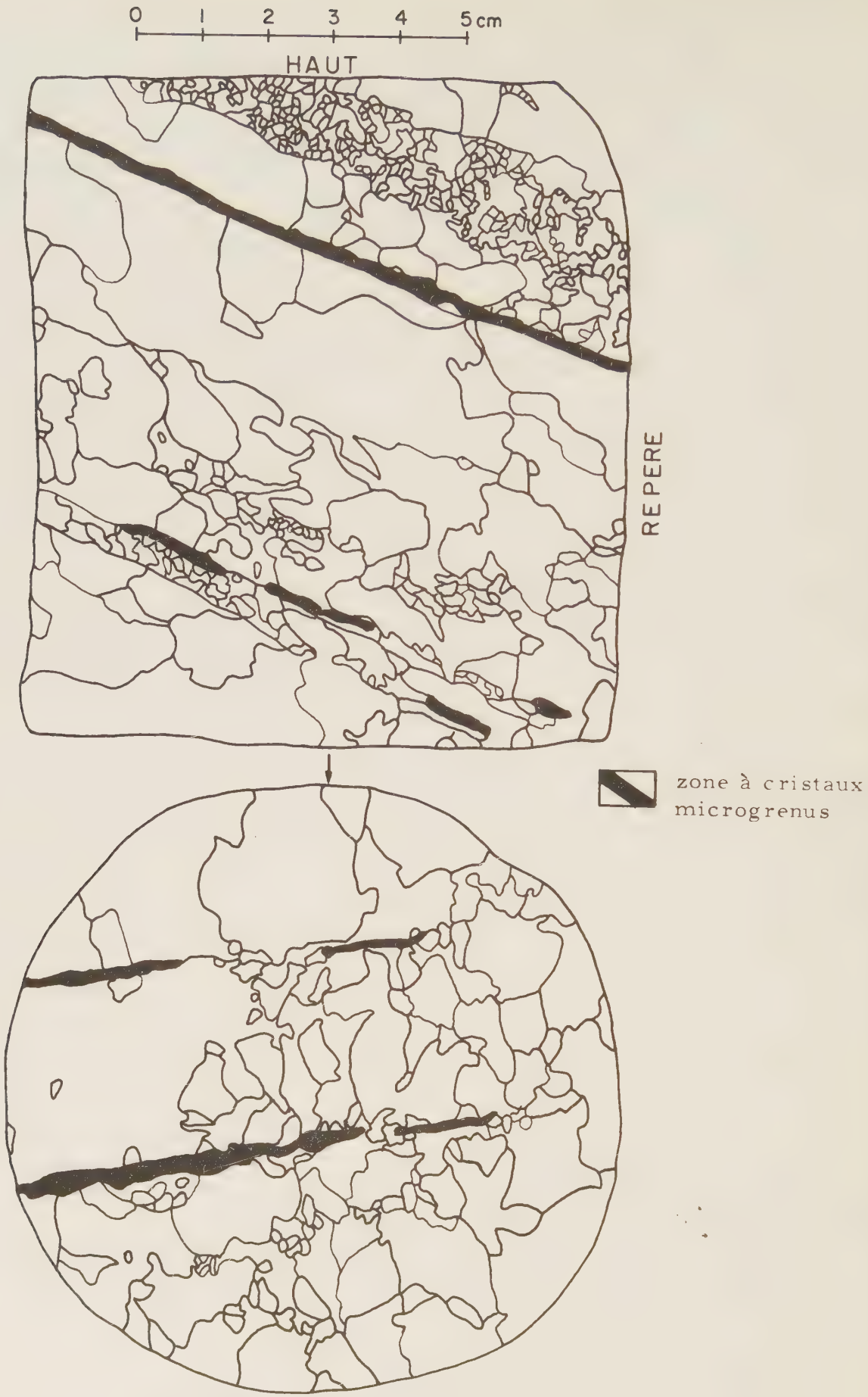


Fig. 24 - Profondeur : 114,5 à 115,0 m

Lames minces voisines verticale et horizontale

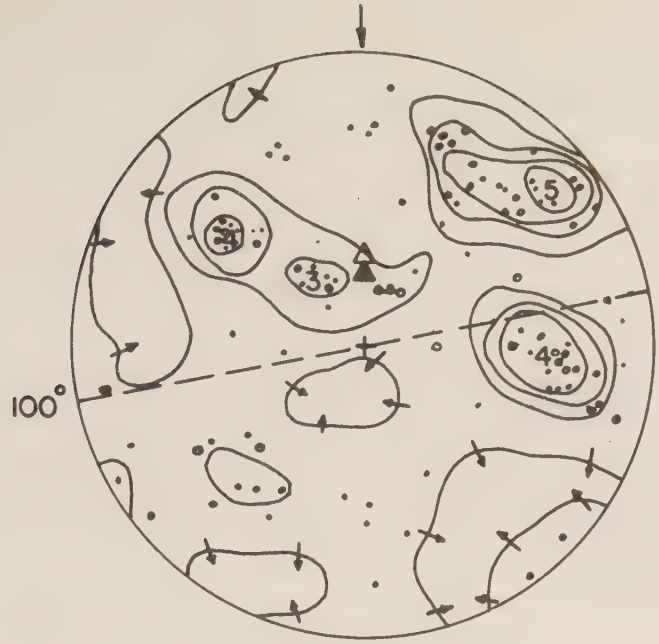


Fig. 25 - Profondeur: 114, 55 m

1 lame mince horizontale - 120 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 3 % de l'aire
Contours à 0, 2, 3, 4, 5 % des points dans 1 % de l'aire
Il y a 73 % des points à l'intérieur des contours 2 %

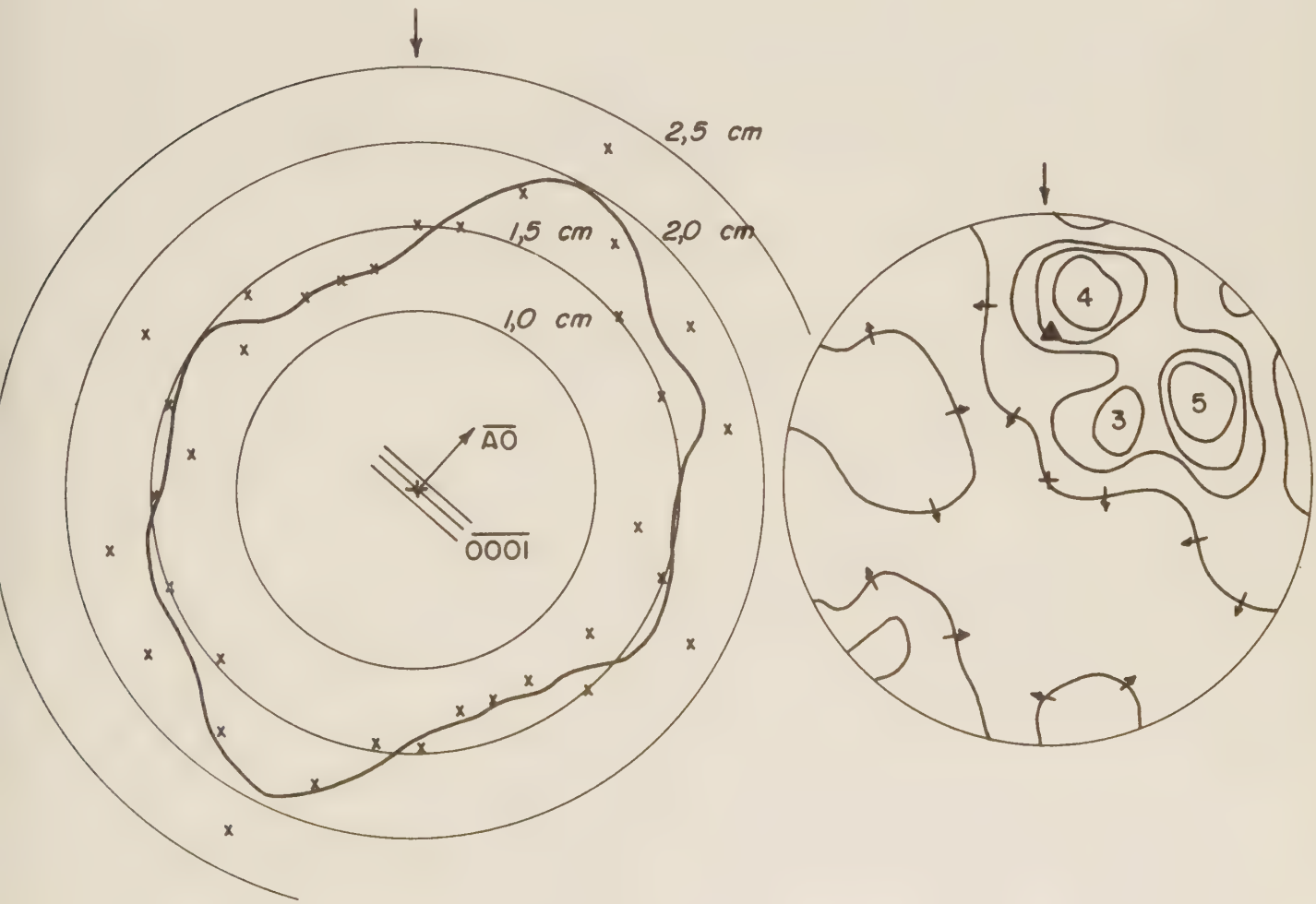


Fig. 26 - Morphologie et orientation des axes optiques des cristaux de glace

Profondeur : 123, 25 à 123, 60 m

5 lames minces horizontales - 88 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 4 % de l'aire
Contours à 0, 2, 3, 4 % des points dans 1 % de l'aire

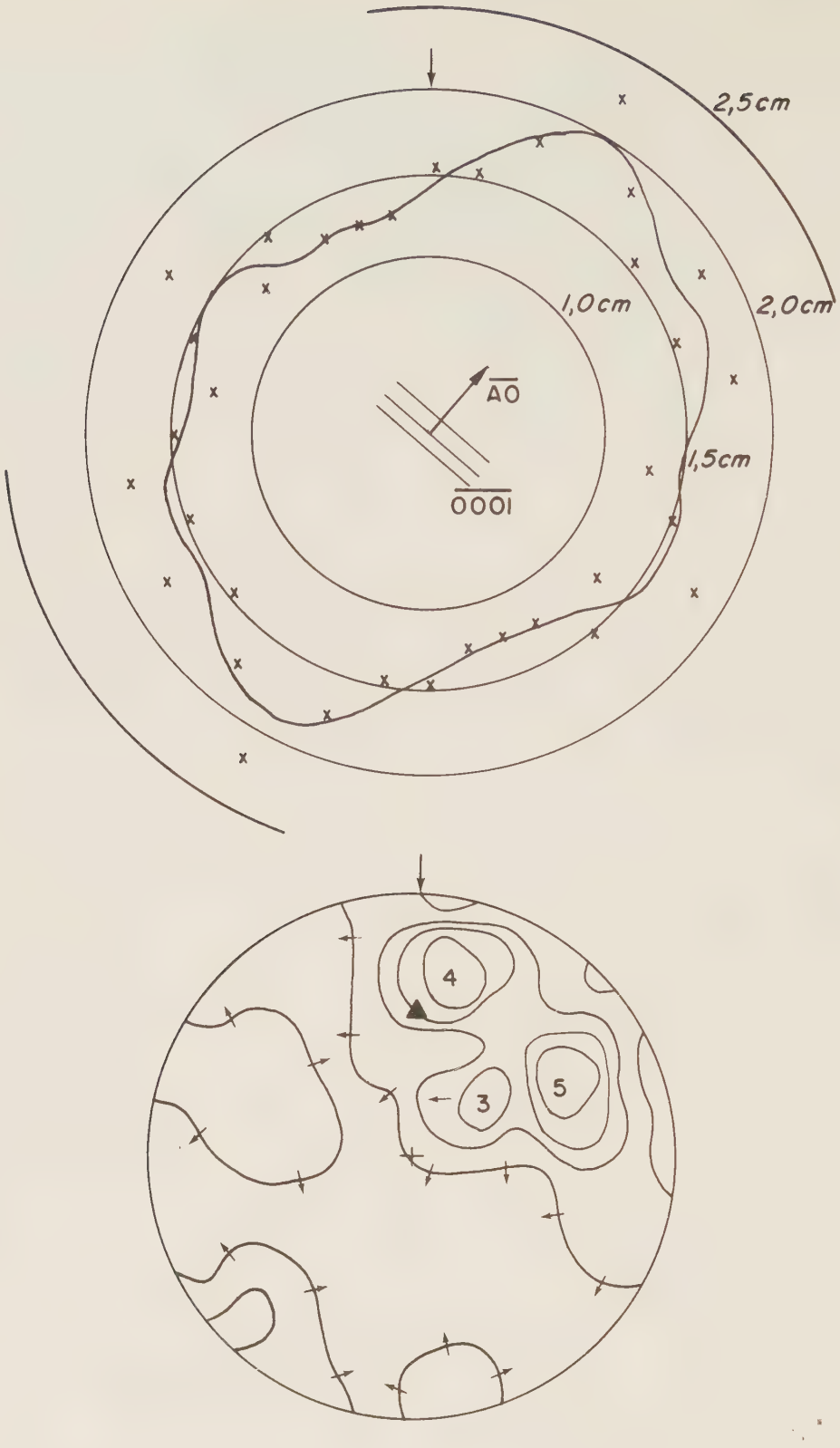


Fig. 26 - Morphologie et orientation des axes optiques des cristaux de glace

Profondeur 123, 25 à 123, 6 m

5 lames minces horizontales - 88 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 4 % de l'aire
Contours à 0, 2, 3, 4 % des points dans 1 % de l'aire

ECHANTILLON N°9

Profondeur : 122,80 à 123,60 m
Fig. 26

Les cristaux de cet échantillon ont une section moyenne de 5,5 cm^2. Aucune zone de cristaux microgrenus ni aucune linéation n'apparaissent. La morphologie et l'orientation des cristaux sont représentées sur la figure 26. Les deux directions les plus importantes font entre elles un angle de 45°, et les deux autres, un angle de 70°.

ECHANTILLON N° 10

Profondeur : 133,30 à 133,70 m
Fig. 27

Les cristaux de cet échantillon ont 2,3 cm^2 de section moyenne. Il existe une zone de cristaux microgrenus à 65° du repère. Le faisceau d'axes optiques est moins incliné que précédemment (fig. 27). Les deux maximums satellites font avec le maximum principal un angle de 35°, et entre eux un angle de 50°. La direction principale est à 20° de la verticale.

ECHANTILLON N°11

Profondeur : 142,60 à 143 m
Fig. 28

La section moyenne des cristaux de cet échantillon est 4,5 cm^2. Cependant l'aire des grains varie beaucoup d'une lame mince à l'autre : sur une lame nous observons 8 cristaux (aire moyenne 10 cm^2) sur une autre 40 (1,7 cm^2 de moyenne). Sur les lames horizontales apparaissent quelques rares zones de cristaux microgrenus, à 110° environ du repère.

La morphologie et l'orientation des grains sont représentées sur la figure 28. Remarquons encore un maximum à 30° de la verticale. Le deuxième maximum, moins important, est à 60° de la verticale. Ils sont légérement décalés par rapport à la direction de la foliation (20° du repère).

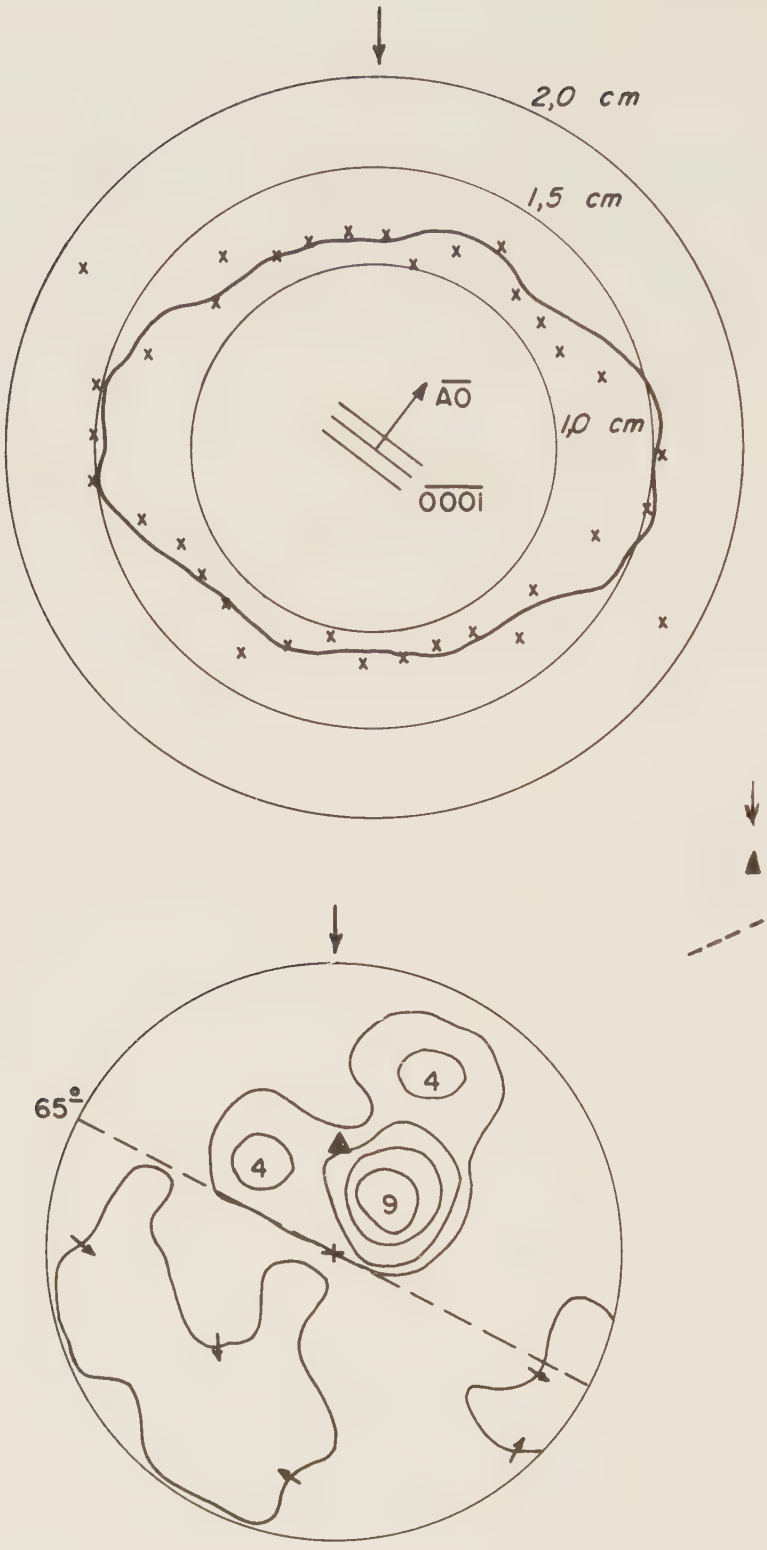


Fig. 27 - Profondeur : 133,35 à 133,7 m

3 lames minces horizontales - 102 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 3 % de l'aire
Contours à 0, 2, 4, 6, 8 % des points dans 1 % de l'aire

ECHANTILLON N°12

Profondeur : 152 à 152,40 m
Fig. 29

A cette profondeur les cristaux sont très petits : 1 mm^2 à 2 cm^2 de section. Ils ne sont pas ramifiés, mais leur contour est dentelé. Il existe une linéation très nette suivant la direction du repère. Sur le stéréogramme (Fig. 29), les deux maximums sont à 8° et 50° de la verticale.

ECHANTILLON N°13

Profondeur : 162,15 à 162,95 m
Fig. 30, 31, 32

Les cristaux deviennent plus gros à cette profondeur : 4 cm^2 de section moyenne. Il existe de très nombreuses zones à très petits cristaux au sein de cet échantillon (Fig. 32). Sur les lames minces horizontales elles sont à 110° du repère, exceptée une, située à 90°. Sur la lame mince verticale, elles sont inclinées de 45°. Elles ont le même pendage que la foliation.

La figure 30 représente la morphologie des cristaux pour deux lames minces voisines, l'une verticale, l'autre horizontale. Pour la lame horizontale, notons un aplatissement de 1,45 à 100° du repère. Pour la lame verticale le coefficient d'aplatissement est très important : 1,79 à 35° de l'horizontale. Le stéréogramme (Fig. 31) montre la texture de cet échantillon.

ECHANTILLON N°14

Profondeur : 170,90 à 171,60 m
Fig. 33, 34, 35

L'aire moyenne des sections de cristaux vaut, à cette profondeur 2,5 cm^2. Quelques zones à cristaux microgrenus apparaissent, mais moins nombreuses que dans l'échantillon précédent (Fig. 33). Sur les lames

horizontales, leur trace est à 100° du repère ; sur la lame verticale, elles sont inclinées à 65°, c'est-à-dire encore une fois suivant la foliation. La morphologie des cristaux (Fig. 34) rappelle celle de l'échantillon précédent. Dans un plan horizontal, les grains sont aplatis dans une direction à 110° du repère (L /1 = 1, 44). Dans le plan vertical parallèle à la ligne de plus grande pente de la foliation, l'aplatissement est 1, 90 à 35° de l'horizontale.

La texture (Fig. 35) présente 3 maximums très nets.

ECHANTILLON N°15

Profondeur : 185, 90 à 186, 70 m
Fig. 36

La glace bleue au contact du lit rocheux est constituée de cristaux très gros (environ 10 cm^2 de section). La texture obtenue (Fig. 36) présente quatre maximums de faible intensité, formant un losange. L'angle entre les deux directions de la grande diagonale vaut 80°, celui de la petite diagonale 40°. L'orientation du stéréogramme par rapport aux précédents est évidemment inconnue en l'absence de foliation.

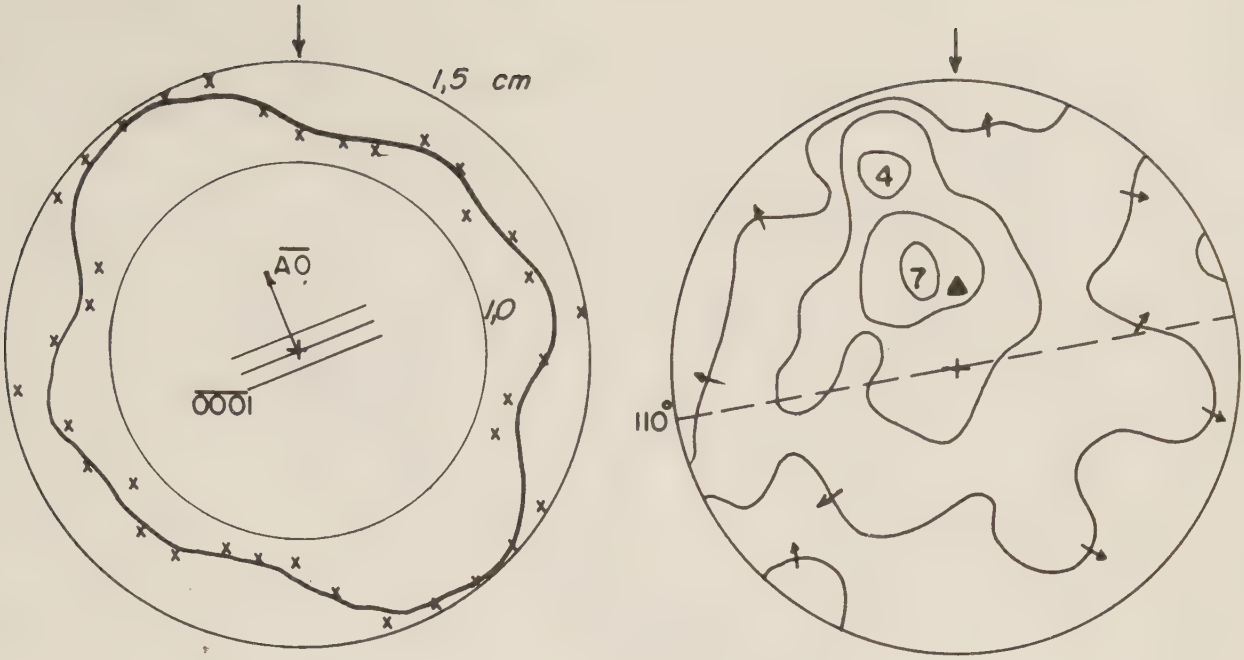


Fig. 28 - Profondeur : 142, 6 à 143 m

4 lames minces horizontales - 91 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 4 % de l'aire
Contours à 0, 2, 4, 6 % des points dans 1 % de l'aire

▲ pôle du plan de foliation
—·—·— linéation
– – – – ligne microgrenue
↓ repère d'orientation

Fig. 29 - Profondeur : 152, 10 m

1 lame mince horizontale - 163 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 3 % de l'aire
Contours à 0, 2, 4, 6, 10, 15 % des points dans 1 % de l'aire

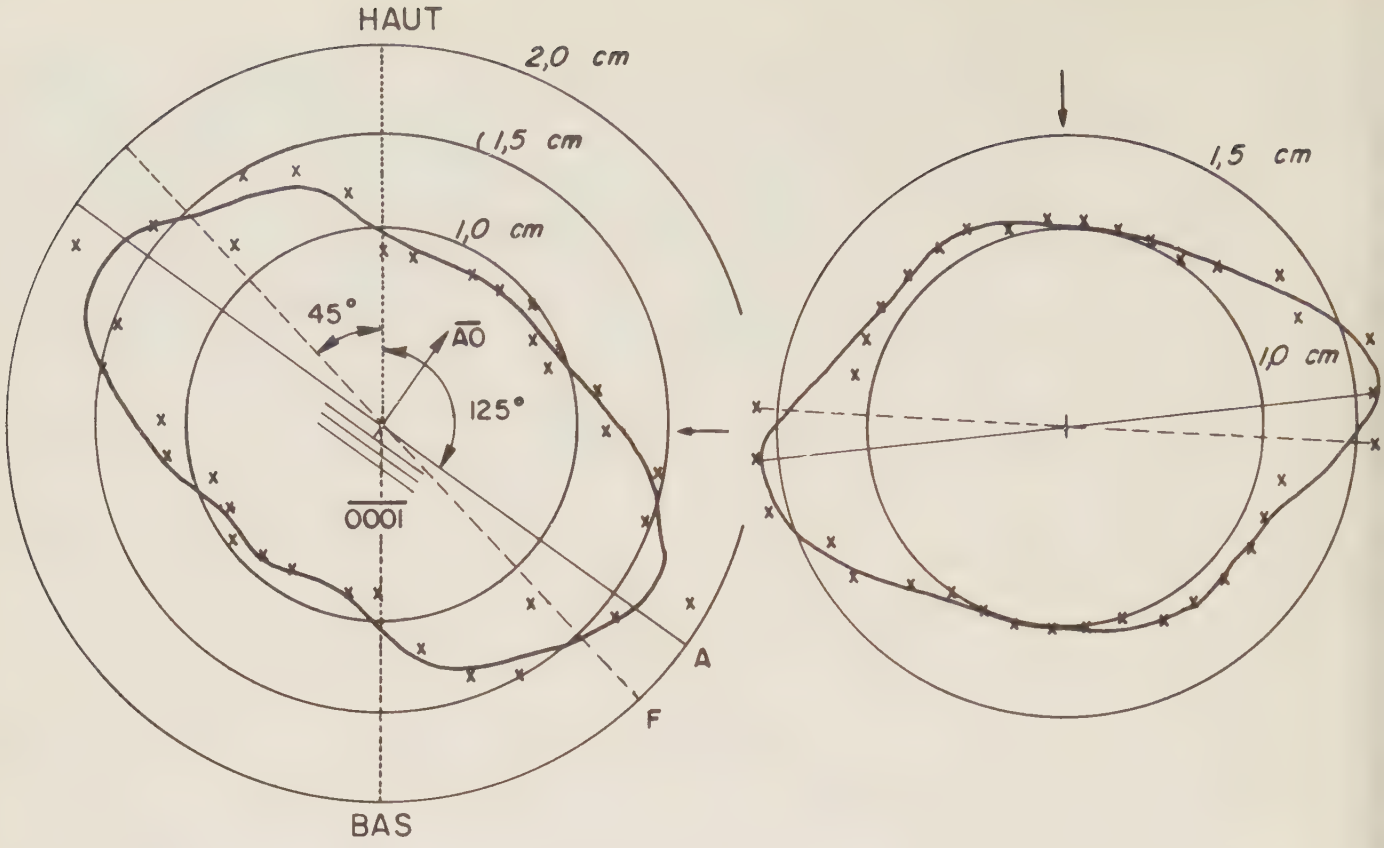


Fig. 30 - Profondeur : 162, 35 à 162, 43 m Profondeur : 162, 45 à 162, 80 m

Morphologie des cristaux de glace
D'après une lame mince verticale (à gauche) et plusieurs lames horizontales (à droite)

▲ pôle du plan de foliation
△ pôle du plan des cristaux microgrenus

——A allongement maximum
------ verticale
↓ repère d'orientation

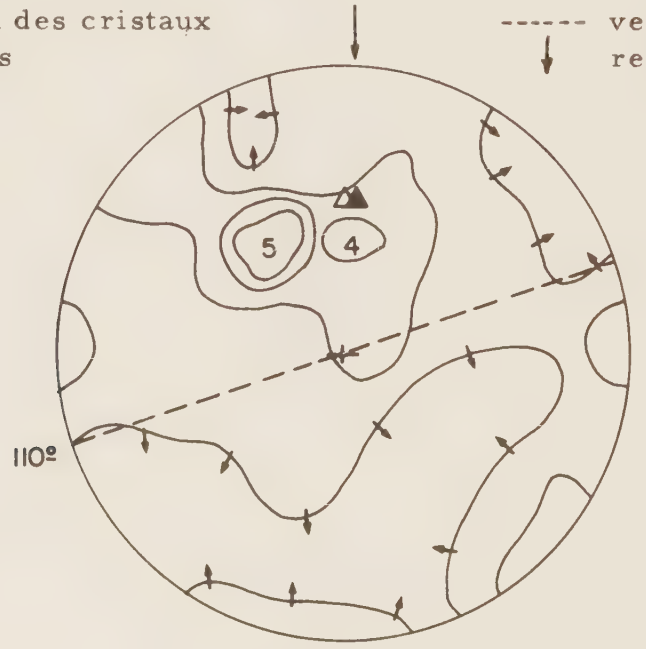


Fig. 31 - Profondeur : 162, 65 à 162, 95 m
4 lames minces horizontales - 74 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 5 % puis 4% de l'aire
Contours à 0, 2, 4, 5 % des points dans 1 % de l'aire

– – – –F direction de la foliation – – – – ligne microgrenue

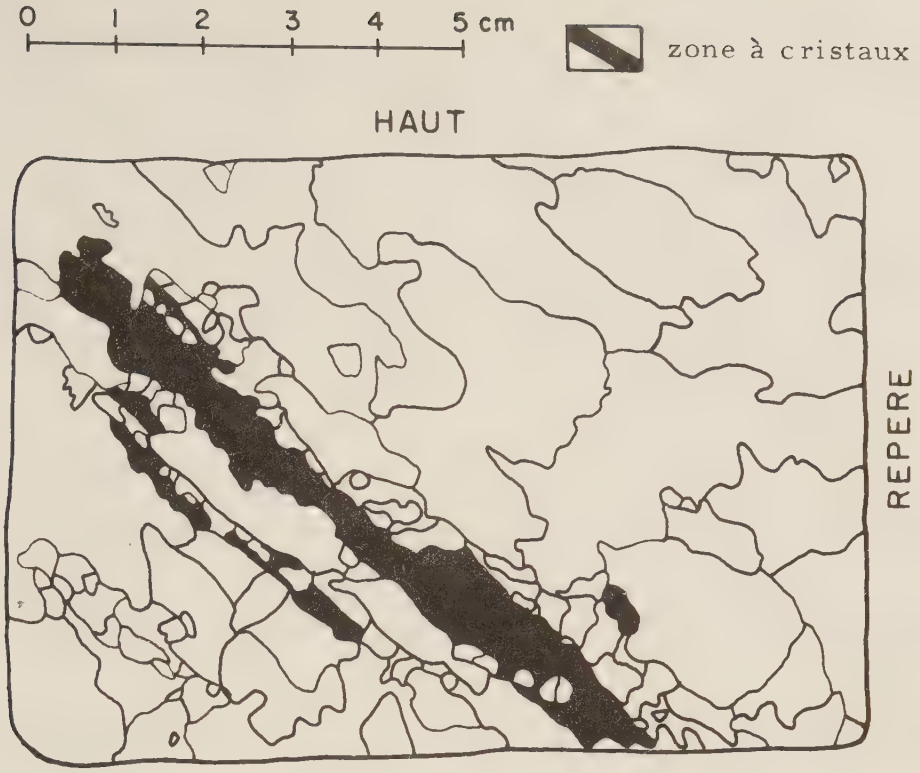


Fig. 32 - Profondeur : 162,4 m

Lame mince verticale

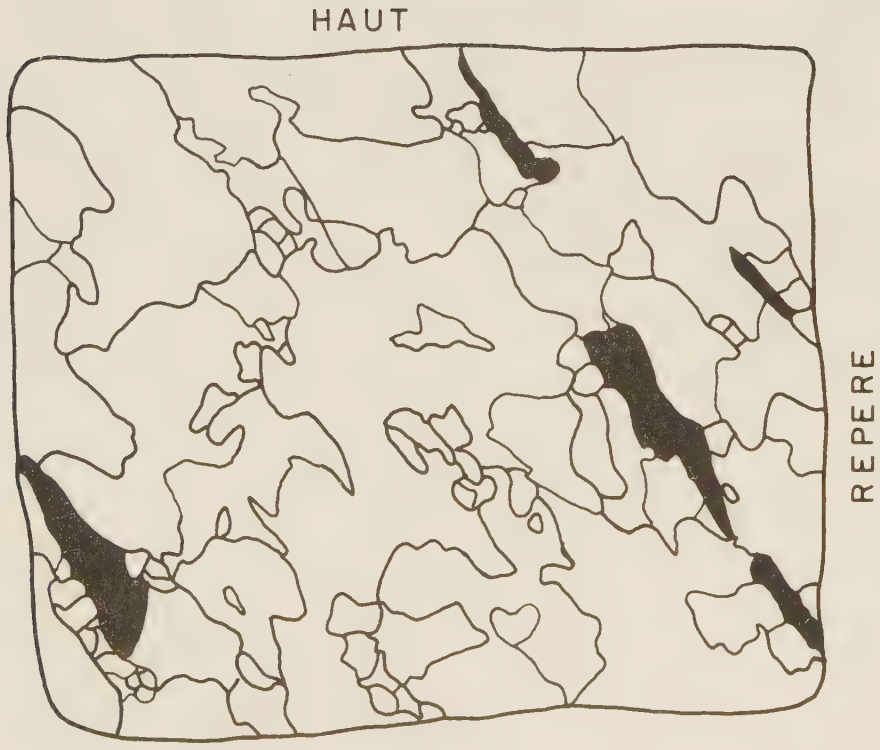


Fig. 33 - Profondeur : 171,6 m

Lame mince verticale

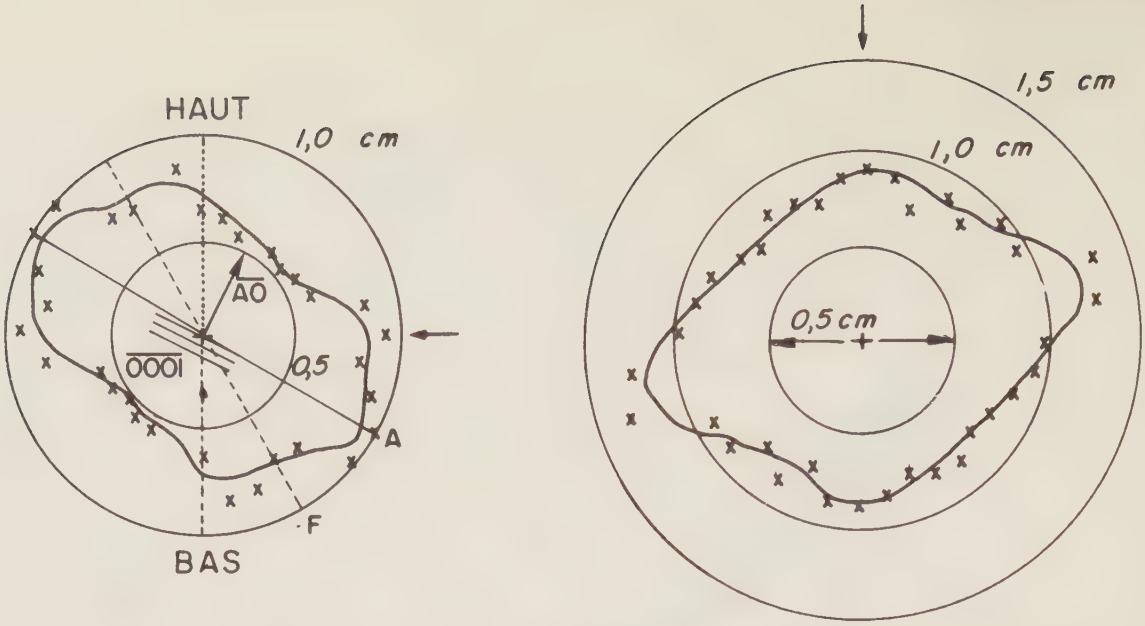


Fig. 34 - Profondeur :171, 52 à 171, 60 m Profondeur : 171, 50 m

Morphologie des cristaux de glace
D'après une lame mince (à gauche) et une lame horizontale (à droite)

▲ pôle du plan de foliation
△ pôle du plan des cristaux microgrenus
---F direction de la foliation
—A allongement maximum
---- verticale
↓ repère d'orientation
— — — ligne microgrenue

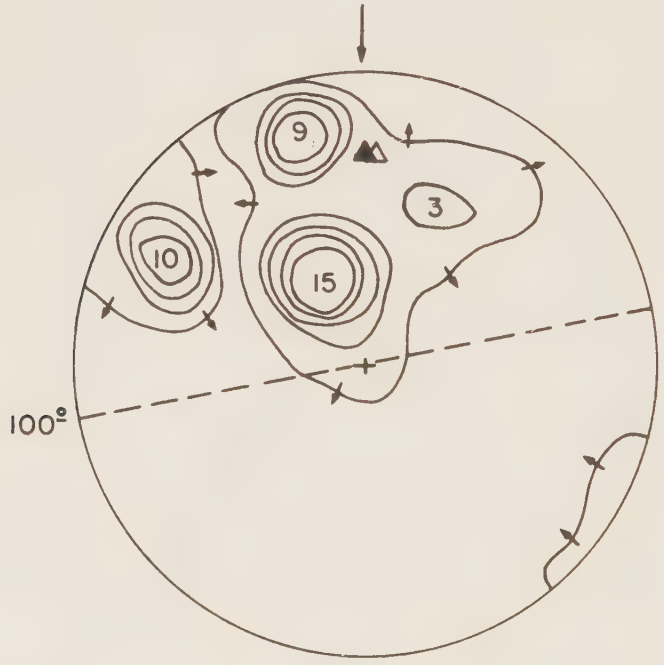


Fig. 35 - Profondeur : 171, 20 à 171, 50 m
3 lames minces horizontales - 88 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 2 % de l'aire
Contours à 0, 3, 6, 9, 12 % des points dans 1 % de l'aire

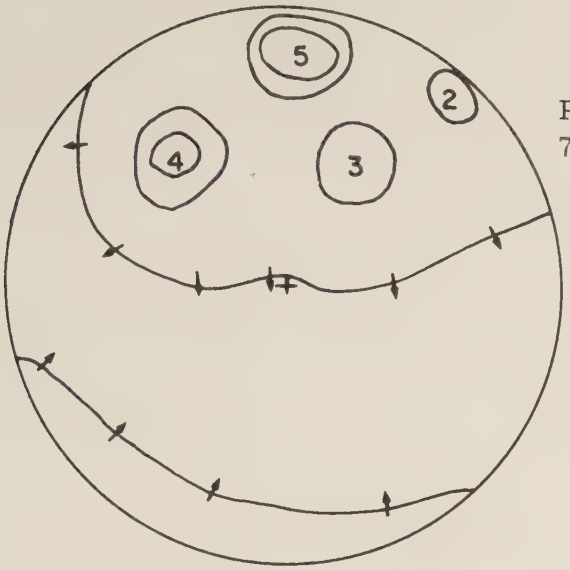


Fig. 36 - Profondeur : 185, 9 à 186, 7 m

5 lames minces. 48 cristaux
Projection de l'hémisphère supérieur - calibre 7, 5 et 4 %
Contours à 0, 2 et 4 % des points dans 1 % de l'aire

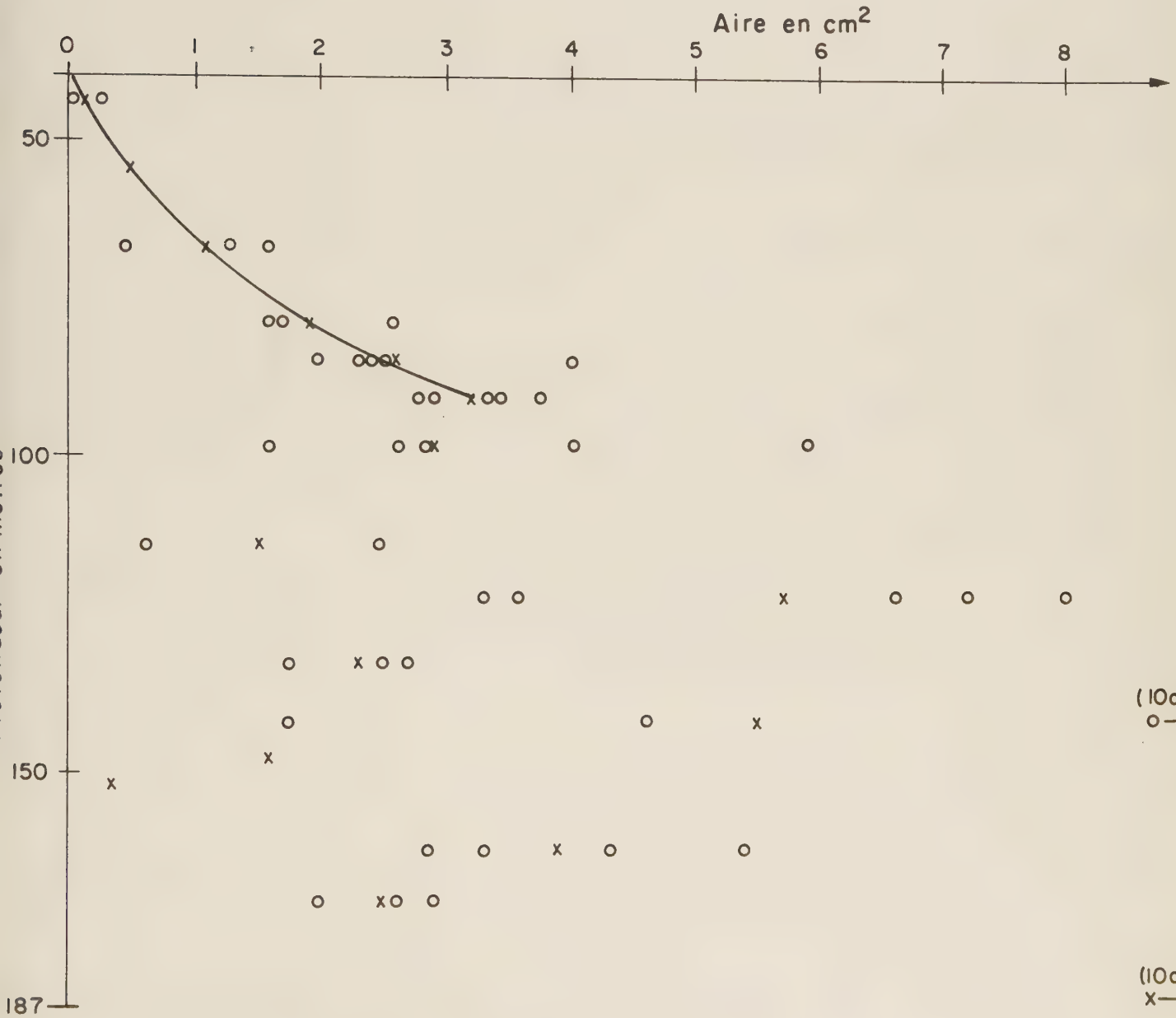


Fig. 37 - Taille moyenne des cristaux en fonction de la profondeur

4 - Essai de synthèse

L'ensemble des stéréogrammes obtenus pour la Vallée Blanche, montre que les orientations des axes optiques ne peuvent être strictement définies en fonction de la profondeur. Nous ne pouvons parler d'évolution, tout au plus existe-t-il une certaine continuité entre 40 et 95 mètres (présence du maximum le plus important toujours suivant la même direction). Par contre pour des tailles de grains semblables, la similitude entre les textures est plus forte. La variation de la taille des grains avec la profondeur peut nous fournir un certain nombre d'indications.

4 - 1 - Taille des cristaux

La figure 37 représente l'évolution de la taille des grains avec la profondeur. Nous remarquons une augmentation continue entre 40 et 95 m. Au-delà, il apparait que, pour un même échantillon, la taille peut varier considérablement d'une lame à l'autre. Pour les cristaux dont l'aire moyenne est supérieure à 0,5 cm^2 environ, cela peut signifier que, s'il y a recristallisation post-cinématique, des zones voisines auraient des vitesses de recristallisation différentes ; s'il n'y a pas eu recristallisation, la taille des grains dépendrait directement de l'énergie de déformation (Steinemann, 1958).

Excepté pour les très petits cristaux (moins de 0,5 cm^2 de moyenne), il n'a pas été possible de déterminer si la texture variait avec la taille à une même profondeur, à cause du trop petit nombre de cristaux sur chaque lame.

4 - 2 - Morphologie des cristaux

Nous calculons pour chaque échantillon un coefficient d'allongement des cristaux, défini comme le rapport de deux longueurs moyennes à 90° l'une de l'autre (approximativement la plus grande sur la plus petite). Ils sont reportés sur le tableau 2 avec la direction de la dimension la plus grande (l'origine des angles, comptés positivement dans le sens direct, est le repère d'orientation).

Profondeur en m	Allongement dans un plan horizontal	Direction (Degrés)
66,70	1,15	15°, 70°, 140°
67,30 à 67,50	1,20	110°
77,10 à 77,45	1,39	10°
84,55 à 84,95	1,18	50°
91,70 à 92,45	1,35	110°
98,70 à 99,30	1,31	140°
123,25 à 123,60	1,28	150°
133,35 à 133,70	1,35	90°
142,60 à 148,80	1,23	40°
162,45	1,54	100°
	vertical : 1,79	35° de l'horizontale
171,50	1,44	110°
	vertical : 1,90	35° de l'horizontale

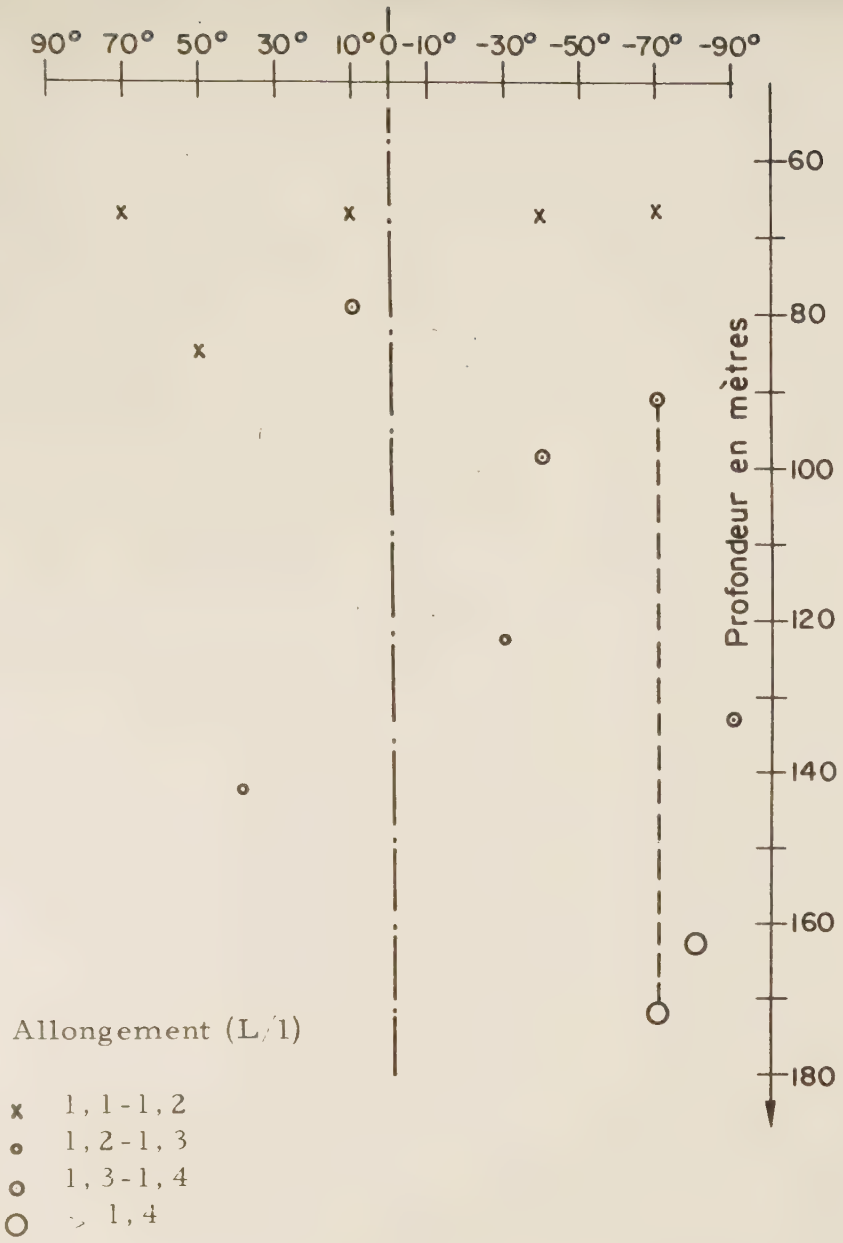


Fig. 38 - Direction d'aplatissement des cristaux dans un plan horizontal en fonction de la profondeur. L'origine des angles est le repère d'orientation. Ils sont comptés positivement dans le sens direct

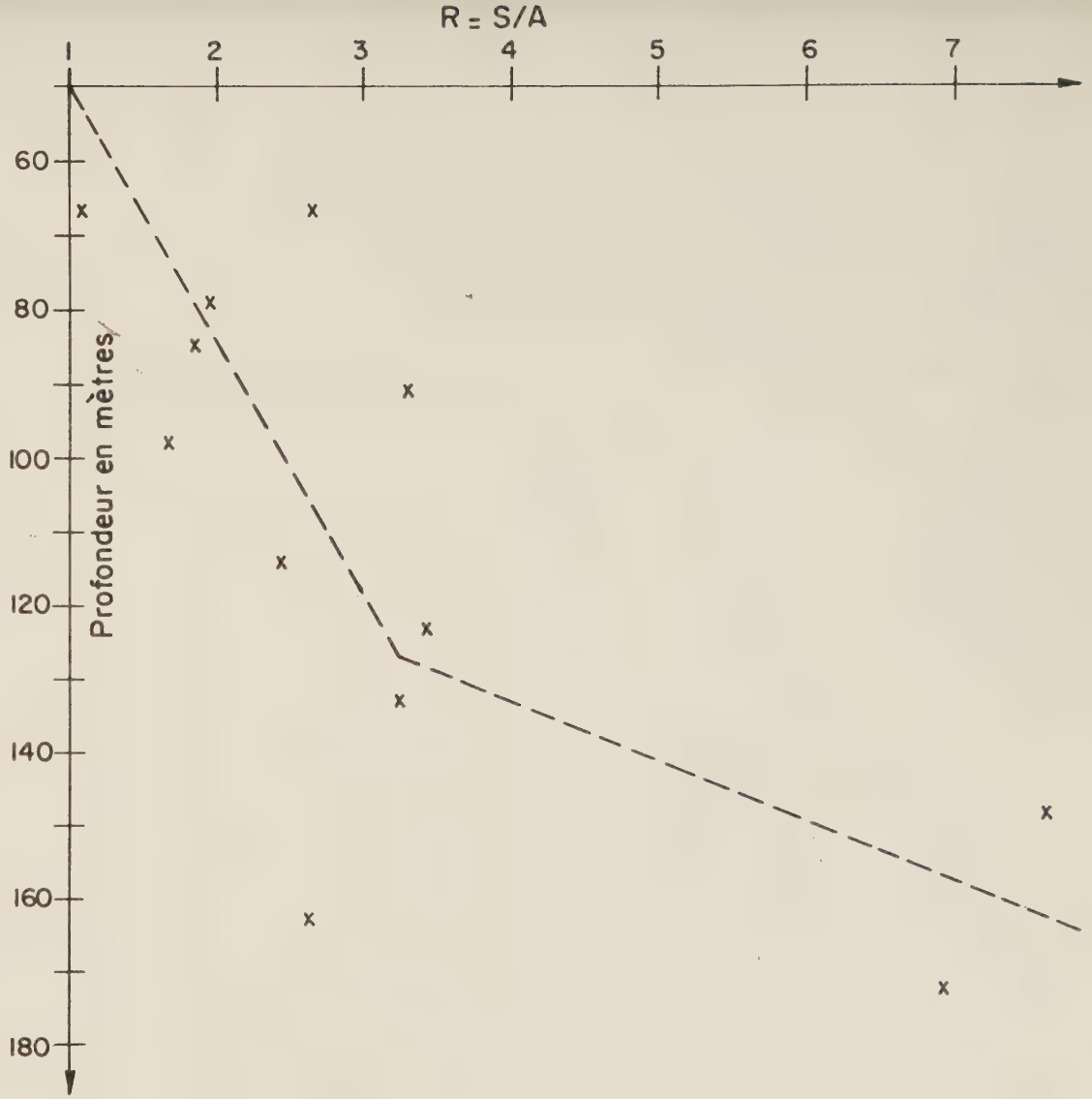


Fig. 39 - Evolution du rapport R = S A avec la profondeur

L'aplatissement des cristaux est pratiquement constant et assez faible jusqu'à 160 m. Par contre la direction de l'allongement des grains subit quelques variations (Fig. 38). A partir de 90 m, elle semble se fixer autour de 110° (soit à 20° de la trace horizontale du plan de foliation).

4 - 3 - Forme des cristaux

Les premiers échantillons sont constitués de cristaux grossièrement sphériques. Au-delà de 95 m (et de façon très nette jusqu'à 150 m) les cristaux sont ramifiés, engrenés les uns dans les autres. C'est une texture tout à fait caractéristique de la glace de glacier. Près du lit, la forme des cristaux semble être beaucoup moins tourmentée.

Deux informations vont nous permettre de préciser la forme des grains. D'une part l'aire réelle moyenne des cristaux d'une lame mince ($\frac{\text{surface lame}}{\text{nombre des cristaux}} = S$) et l'aire moyenne (A) calculée d'après la mesure des longueurs moyennes (cf. 3-2-2). Si tous les cristaux avaient des formes géométriques simples, le rapport R = S/A serait très voisin de 1. A mesure que les contours du cristal se compliquent, ce rapport va croître. Malgré quelques fluctuations, la quantité R augmente avec la profondeur (Fig. 39).

4 - 4 - Textures

Nous envisagerons séparément le cas des cristaux dont l'aire est inférieure à 0,5 cm^2.

a - Pour les gros cristaux, le nombre de maximums observés sur chaque échantillon varie entre 2 et 5. Entre 54 et 95 m, il existe une même direction préférentielle sur chaque échantillon. Son intensité passe successivement de 6 % à 5 %, 5% encore, 2% et 8%. Ceci est à rapprocher de la valeur de S/A : c'est pour l'échantillon correspondant à ce dernier pourcentage que le rapport est le plus important. La partie du glacier considérée est très probablement en extension. Il semble donc que cette direction préférentielle soit liée à l'axe de compression.

Entre 95 et 180 m, il existe encore un bon accord entre la densité du maximum le plus important et le rapport R (Tableau 3). L'exception à 143 m est peut être due au fait que le maximum de 7% occupe une surface assez importante.

Il est difficile d'expliquer la présence des autres maximums sur le stéréogramme. Nous pouvons dire cependant que dans le cas où il existe deux directions à 90° environ l'une de l'autre, il se trouve un petit nombre de cristaux groupés deux à deux et dont les axes optiques sont perpendiculaires (l'un appartient à la première direction, l'autre à la seconde).

b - Les petits cristaux (taille moyenne inférieure à 0,5 cm^2) peuvent se subdiviser en deux populations distinctes : l'une formée de cristaux de l'ordre du millimètre carré, et l'autre de cristaux entre 10 et 50 mm^2 (Tableau 4).

Tableau 3

Profondeur m	Nombre de maximums sur le stéréogramme	Intensité du plus important en %	Valeur du rapport R =S/A
66,70	4	3	1,15
67,30 à 67,50	4	5	2,66
77,10 à 77,45	5	5	1,97
84,55 à 84,95	4	2	1,87
91,70 à 92,45	4	8	3,32
98,70 à 99,30	3	4	1,68
114,50 à 115,00	4	5	2,44
123,25 à 123,60	3	5	3,44
133,35 à 133,70	3	9	3,26
142,60 à 148,80	2	7	7,69
152 à 152,40	2	15	
162,45	3	5	2,64
171,50	4	15	7

Tableau 4

Profondeur m	Nombre de maximums	Position	Intensité
1 - Cristaux de l'ordre de quelques mm^2			
44,45	1	près du pôle de foliation	8 %
99,50	2 (voisins:18°)	"	4 % chacun
142,60	1	"	14 %
2 - Cristaux dont la section est comprise entre 10 et 50 mm^2			
44,40	2 (à 40°)	de part et d'autre du pôle de la foliation	7 et 4 %
54,25	2 (à 55°)	"	7 et 3 %
66,75	3	dont 1 est très prés du pôle	3, 3, 3 %
152,10	2 (à 45°)	de part et d'autre du pôle de la foliation	10 et 15 %

Les textures obtenues justifient ce classement : une population (que nous appelons microgrenue) possédant un maximum (ou deux très voisins) près du pôle de foliation, et une seconde population ayant deux ou trois maximums distincts.

Les échantillons étudiés renferment fréquemment des zones microgrenues, mais elles sont en général très petites et ce n'est qu'à 44 et 99 m qu'un nombre suffisant de ces cristaux nous a permis de déterminer leur texture. Par ailleurs nous avons retrouvé un échantillon dont la teneur en eau liquide avait été déterminée (1426 m). Il renferme une strate de 4 cm de cristaux microgrenus, inclinés à 30° de l'horizontale, c'est-à-dire pratiquement parallèle à la foliation. Sa texture est reproduite figure 40.

La valeur de la teneur en eau correspondante est exceptionnellement forte : 2 % (Petit, 1972). Est-ce dans ces parties microgrenues très anisotropes que se produit la plus grande partie de la déformation du glacier ?

4 - 5 - Observations complémentaires

Plusieurs échantillons de glace bleue ont été prélevés dans la galerie EDF de la Mer de Glace. Un premier échantillon a été immédiatement enfermé dans une cantine avec eutectique (à - 10°C environ) et transporté très rapidement en chambre froide. Les autres, sans précautions particulières, ont été stockés dans une deuxième cantine. Dans le premier cas, tous les cristaux étaient de très petite taille, tout à fait semblables à ceux d'Argentière (et de surcroit de même texture). Par contre les autres échantillons étaient constitués de gros cristaux (2 à 3 cm^2 de section), et parmi eux quelques bandes de cristaux migrenus, de même taille que les grains non recristallisés.

Ainsi certains cristaux, formant des bandes discrètes, ne recristalliseraient pas quand ils sont extraits de leur contexte naturel de contraintes. Ceci n'a, malheureusement, pu être observé sur l'échantillon d'Argentière. Mais ces bandes microgrenues sont rares : celle observée sur l'échantillon de la Mer de Glace ne représentait qu'un demi centimètre sur un échantillon de 20 cm de long ; l'échantillon du glacier d'Argentière, dont la recristallisation a été suivie, ne mesurait que 10 cm de long.

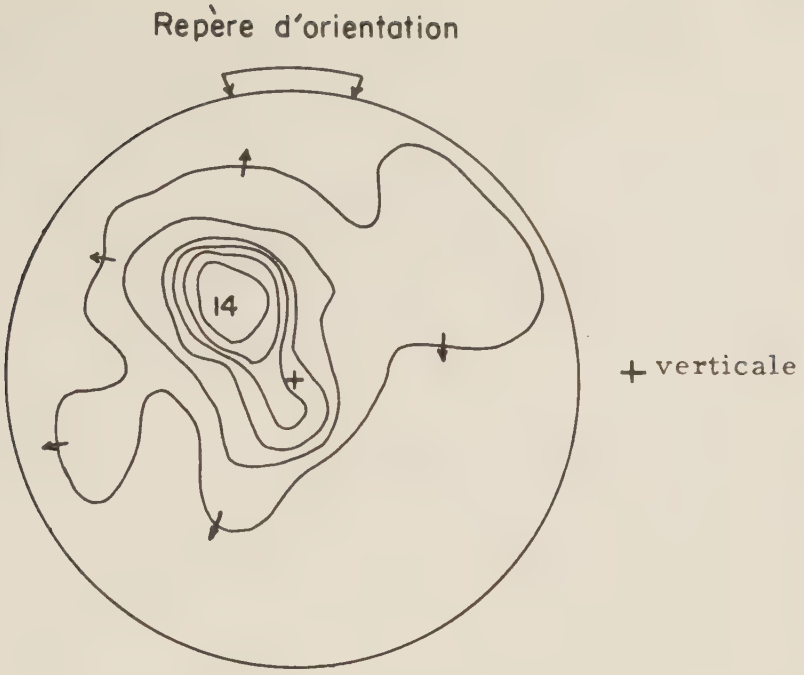


Fig. 40 - Profondeur : 142,6 m

1 lame mince - 100 cristaux
Projection sur l'hémisphère supérieur - calibre 2 % de l'aire
Contours à 0, 2, 4, 6, 8, 10 % des points dans 1 % de l'aire

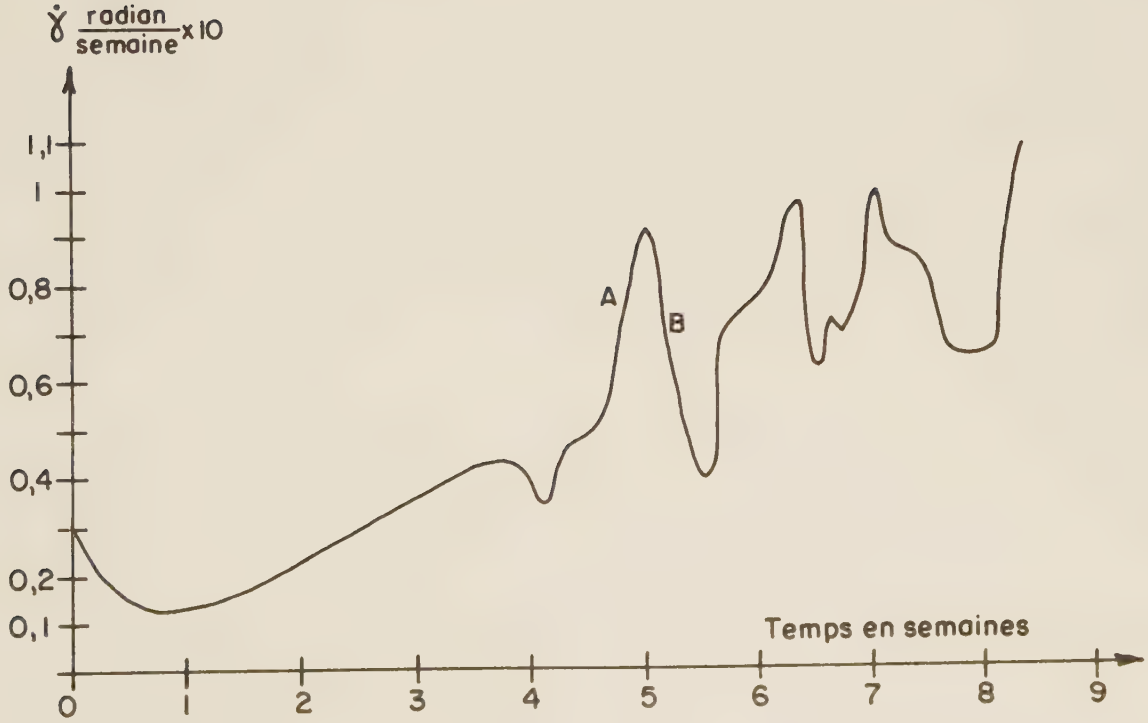


Fig. 41 - Courbe de fluage $\gamma = f(t)$ (d'après Duval)
Glace initialement isotrope
$\tau = 2,7$ kgf/cm²
Température : $-1 \pm 0,1$°C

Conclusion

Excepté entre 30 et 95 m où la croissance des cristaux est continue et monotone, la taille des grains, tout au long du profil de la Vallée Blanche présente beaucoup d'irrégularités. Après l'expérience sur l'échantillon de la Mer de Glace nous pouvons nous demander quelle est la taille réelle des cristaux au sein du glacier, sans pouvoir y apporter de réponse définitive. Hors des contraintes du glacier, certains cristaux ne recristallisent pas en post-cinématique. Leurs axes optiques se trouvent suivant une ou deux directions préférentielles. Cette orientation correspond peut être à une position favorable à la déformation.

Or Duval (1972) a observé, sous contraintes moyennes, des processus périodiques de recristallisation dynamique. Sur la courbe de fluage obtenue pour une cission efficace de 2,7 kg/cm^2 (Fig. 41), la partie A peut s'interprêter par une recristallisation ou par l'apparition d'une texture favorable ; la partie B par un écrouissage ou par la destruction de cette texture. Nous pourrions imaginer que dans un glacier se trouvent des cristaux correspondant aux divers états A et B dans une petite portion de l'espace (à l'échelle de quelques cm). D'ailleurs, en laboratoire , les oscillations ne sont visibles que sur les petits échantillons, alors qu'elles sont "intégrées" sur les échantillons plus importants. L'énergie élastique de chaque groupe de cristaux est variable suivant sa position sur la courbe de fluage, ce qui expliquerait les différences de tailles observées après recristallisation post-cinématique. Rigsby observait de très gros cristaux bien qu'il ait fabriqué ses lames minces sur le glacier, immédiatement après les prélèvements. Mais, il s'agissait d'échantillons prélevés en zone d'ablation à proximité de la surface. Au cours de son histoire, cette glace a été soumise à des contraintes importantes dans la masse du glacier ; au moment où elle affleure, elles sont pratiquement nulles : une recristallisation "post-cinématique" a pu ainsi se produire.

L'intensité des contraintes près du lit de la Mer de Glace et du glacier d'Argentière est vraisemblablement beaucoup plus importante que sur la Vallée Blanche. Il apparaît cependant qu'un petit nombre d'heures suffit pour modifier la taille des cristaux des échantillons.

Les bandes de cristaux microgrenus observées sur les échantillons de la Vallée Blanche sont inclinées à peu près parallèlement à la foliation. La direction d'allongement des plus gros cristaux, par contre, n'évolue pas de la même manière, et ne fait jamais plus de 35° avec l'horizontale.

Pour les petits cristaux il existe une ou deux directions d'orientation préférentielle. Pour les grains de section supérieure à 0,5 cm^2 environ, il y en a souvent 4, l'une d'elles étant peu importante. La position relative de ces dernières présente des variations selon la profondeur, sans qu'il soit possible de mettre en évidence une véritable évolution. Dans un cas précis, nous avons montré que la recristallisation post-cinématique atténuait l'anisotropie mais ne modifiait pas la texture. Ceci devrait nous rassurer sur la validité des résultats obtenus pour la Vallée Blanche. Il faudrait néanmoins effectuer systématiquement une série d'expériences pour connaître l'évolution de la glace hors de son contexte naturel.

REFERENCES

BADER, H., (1951). Introduction to ice petrofabrics. J. Geol., 59 (6), p. 525.

BLINOVA, V. L. , and Y. S. TROSHKINA, (1962). Gidrologiya strukturnyye issledovaniya. Materialy Gliatsiologicheskich Issledovanniy, Elbrus, 77-138.

BRACE W. F., (1960). Orientation of anisotropic minerals in a stress field. Symp. on rock deformation. Geol. Soc. of America, mem. 79, 9-20.

CHOUMSKY P. A., (1957). Principes de glaciologie structurale. Ann. du Centre d'Etude et de Documentation Paléontologique, 22, 309 p.

DUVAL P., (1972). Fluage et recristallisation dynamique de la glace polycristalline. C. R. Acad. Sc. Paris, 275, 337-339.

GILLET F., (1969). Forages et carottages dans le glacier de Saint-Sorlin. Laboratoire de Glaciologie du C. N. R. S., Grenoble, Communication à la S. H. F., réunion du 4 mars 1969, 17 p. ronéo.

JONSSON S., (1970). Structural studies of subpolar glacier ice. Geografiska annaler, 52, 129-145.

KAMB W. B., (1959 a). Ice petrofabric observations from Blue Glacier (Washington) in relation with theory and experiment. J. Geoph. Res. 64 (11), 1891-1909.
(1959 b). Theory of preferred crystal orientation developped by cristallization under stress. J. Geol., 67 (2), 153-170.
(1962). An experimental test of theories of nonhydrostatic thermodynamic abstract. J. Geophys. Res., 67 (4) , 1642 (abstract).

KIZAKI K., 1962. Ice fabric studies on Hamma Ice Fall and Honnörbrygga Glacier, Antarctica. Antartic Record, 16, 54-74.
(1969)a . Ice fabric study of the Mawson region, East Antarctica. J. Glac. 8, 253-276.
(1969)b. Fabric analysis of surface ice near Casey Range, East Antarctica. J. Glac., 8, 375-383.

LANGWAY C. C., 1958. Ice fabrics and the universal stage. SIPRE Tech. Rep. 62, 15 p.

LLIBOUTRY L., 1965. Traité de Glaciologie (2 tomes). Masson et Cie, Paris, 1040 p.

PERUTZ M. F. and SELIGMAN G., 1939. A crystallographic investigation of ice structure and the mechanism of glacier flow. Proc. Royal Soc. London, 172 (950), 335-360.

PETIT J. R., 1972. Bilans annuels, transformation du névé en glace, teneur en eau de la glace profonde (Vallée Blanche Supérieure, Massif du Mont Blanc), Thèse de 3e cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Publ. n° 145, Laboratoire de Glaciologie, CNRS, 78 p.

RAMSAY J.G., 1967. Folding and fracturing of rocks, Mc Graw Hill , 568 p.

REID J.R., 1964. Structural glaciology of an ice layer in a firn fold, Antarctica. Antarctic Research Series 2, 237-266.

RIGSBY G.P., 1951. Crystal fabric studies on Emmon Glacier, Mount Rainier (Washington). J. Geol. 59 (6), 590-598.
1960. Crystal orientation in glacier and in experimentally deformed ice. J. Glac. 3 (27), 589-606.

SCHMIDT E. and BOAS W., 1968. Plasticity of crystals. Chapman and Hall, London.

STEINEMANN S., 1958. Experimentelle Untersuchungen zur Plastizität von Eis. Beiträge zur geologie der Schweiz, Hydrologie n°10.

VALLON M., 1967. Contribution à l'étude de la Mer de Glace, 2ème partie, Thèse de Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences de Grenoble, Rapport Scientifique n°103 du Laboratoire de Géophysique et Glaciologie de Grenoble, CNRS, 72 p.

YOSIDA Z. and KOJIMA, 1954. Acceleration of metamorphosis of snow by temperature gradient. A.I.H.S., 39 (Rome), 4, 92-97.